

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного
технического университета им. Г. И. Носова

№4 (48) декабрь 2014 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. Электронные версии журнала размещаются на сетевом ресурсе Научной Электронной Библиотеки в сети Интернет.

Издается с марта 2003 года

Редакционный совет

Председатель редсовета:

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

Члены редсовета:

А.В. Дуб – ген. директор ОАО НПО

«ЦНИИТМАШ», д-р техн. наук;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Главный редактор:

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

Первый зам. главного редактора:

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

Зам. главного редактора:

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

Ответственные секретари:

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

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

Редактор: Н.В. Кутекина.

Технический редактор: К.В. Гаврусева.

Перевод на английский: О.Е. Сухих.

© ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2014

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 Управлением Федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций
и охране культурного наследия по Уральскому федеральному округу.

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 25.12.2014. Заказ 840. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

No. 4 (48) December 2014

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. Online versions of the journal can be found in the Scientific Electronic Library collection on the Internet.

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

Editorial Board Members

Chairman:

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

Honorary Board Members:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editor-in-Chief:

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

First Deputy Editor-in-Chief:

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

Deputy Editor-in-Chief:

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

Executive Editors:

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

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

Editor: N.V. Kutekina.

Technical Editor: K.V. Gavrusseva.

Translated into English: O.E. Sukhikh

© Federal State Budgetary Institution of Higher Professional Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014

Registration certificate PI # FS 77-59632 dated October 10, 2014

Issued by the Administration of the Federal Service for Media Law Compliance and Cultural Heritage in the Urals Federal District.

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: 25.12.2014. Order 840. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых	5
<i>Вохмин С.А., Курчин Г.С., Кирсанов А.К., Дерыгин П.А.</i> Методика расчета параметров буровзрывных работ при проходке горизонтальных и наклонных горных выработок	5
<i>Мещеряков Э.Ю., Валеев А.С., Аллабердин А.Б.</i> Обоснование параметров комбинированного закладочного массива при восходящем порядке отработки месторождений	10
<i>Першин Г.Д., Уляков М.С.</i> Анализ влияния режимов работы канатных пил на эффективность отделения монолитов природного камня от массива	14
Обработка металлов давлением	22
<i>Няшин Ю.И., Осипенко М.А., Гитман М.Б.</i> Равнонапряженные листовые рессоры	22
<i>Барышников М.П., Чукин М.В., Бойко А.Б., Дья Х., Назайбеков А.Б.</i> Методы исследования механических характеристик металлов и сплавов в процессах обработки давлением с учетом неоднородности структуры	26
<i>Песин А.М., Корчунов А.Г., Пустовойтов Д.О., Ванг К., Танг Д., Ми Ж.</i> Конечно-элементное моделирование сдвиговых деформаций в различных процессах асимметричной прокатки	32
Технологии обработки материалов	41
<i>Чукин М.В., Салганик В.М., Полецков П.П., Денисов С.В., Кузнецова А.С., Бережная Г.А., Гущина М.С.</i> Основные виды и области применения наноструктурированного высокопрочного листового проката	41
<i>Калляри И., Бреда М., Фриго М., Пеллициари М., Рамосу Э.</i> Изотермическое старение экономно легированной дуплексной нержавеющей стали	44
<i>Белевский Л.С., Белевская И.В., Ефимова Ю.Ю., Копцева Н.В.</i> Ударно-фрикционная комбинированная обработка гибким инструментом... 53	53
<i>Дюжечкин М.К., Сергеенко С.Н.</i> Особенности влияния состава размольных сред при механохимической активации шихты на формирование горячедеформированного порошкового материала системы Al-Si-C	57
<i>Самодурова М.Н., Барков Л.А., Джигун Н.С., Латфулина Ю.С.</i> Новые способы и устройства, дегазирующие углеродные порошковые композиции перед компактированием	63
<i>Лехов О.С., Турлаев В.В., Лисин И.В., Тувев М.Ю.</i> Исследование совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства биметаллических полос	69

CONTENTS

Mining and Mineral Processing	5
<i>Vokhmin S.A., Kurchin G.S., Kirsanov A.K., Deryagin P.A.</i> Calculation of parameters of drilling and blasting operations for horizontal and incline working	5
<i>Meshcheryakov E.Yu., Valeev A.S., Allaberdin A.B.</i> Rationale for parameters of a combined filling mass in ascending exploitation mining	10
<i>Pershin G.D., Ulyakov M.S.</i> Analysis of the influence of cable saw operation modes on cutting of natural stone monoliths from a massif	14
Metal Forming	22
<i>Nyashin Yu.I., Osipenko M.A., Gitman M.B.</i> Equal-stress leaf springs	22
<i>Baryshnikov M.P., Chukin M.V., Boyko A.B., Dyja H., Nazaybekov A.B.</i> Research methods of mechanical properties of metals and alloys during their forming subject to an inhomogeneous structure	26
<i>Pesin A., Korchunov A., Pustovoytov D., Wang K., Tang D., Mi Z.</i> Finite element simulation of shear strain in various asymmetric cold rolling processes	32
Materials Processing Technologies	41
<i>Chukin M.V., Salganik V.M., Poletskov P.P., Denisov S.V., Kuznetsova A.S., Berezhnaya G.A., Gushchina M.S.</i> Main types and application of nanostructured high-strength sheet products	41
<i>Calliari I., Breda M., Frigo M., Pellizzari M., Ramous E.</i> Isothermal ageing in lean duplex stainless steels	44
<i>Belevskiy L.S., Belevskaya I.V., Efimova Yu.Yu., Koptseva N.V.</i> Impact friction combined processing by flexible tools	53
<i>Dyuzhechkin M.K., Sergeenko S.N.</i> Special features of effect of grinding media during mechanochemical activation of a mixture on the formation of hot-deformed Al-Si-C powder material	57
<i>Samodurova M.N., Barkov L.A., Dzhigun N.S., Latfulina Yu.S.</i> New methods and mechanisms degassing carbon powder compositions before compacting	63
<i>Lekhov O.S., Lysin Ilya Vy., Turlaev V.V., Tudev M.Yu.</i> The production of bimetallic strips within a combined continuous casting and deformation process	69

Охрана труда в металлургии.....	74	Occupational Safety in Metallurgy	74
<i>Десятченко Л.Д., Соколова Э.И.</i> Каноническая связь травматизма и человеческого фактора в черной металлургии.....	74	<i>Devyatchenko L.D., Sokolova E.I.</i> A canonical connection between injuries and a human factor in ferrous metallurgy	74
Теория и методика обучения и воспитания.....	81	Teaching and education theory and methods	81
<i>Черчинцев В.Д., Нefeldова Е.В.</i> Интеграция экологического и технического образования как условие профессионального становления выпускника технического вуза	81	<i>Cherchintsev Vy.D., Nefedova E.V.</i> Integration of environmental and technical education as a condition of professional development of technical university graduates	81
Научный обзор	87	Scientific review.....	87
<i>Колокольцев В.М., Петроченко Е.В.</i> Металлургические и металловедческие аспекты повышения функциональных свойств литых изделий из белых чугунов	87	<i>Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V.</i> Metallurgical and physicomettallurgical aspects related to improvement of functional properties of white iron castings.....	87
<i>Гун Г.С.</i> Инновационные методы и решения в процессах обработки материалов	99	<i>Gun G.S.</i> Innovative methods and decisions in materials processing	99
Сведения об авторах	114	Information about authors	114

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.233:622.235

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ ПРИ ПРОХОДКЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ И НАКЛОННЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Вохмин¹ С.А., Курчин¹ Г.С., Кирсанов¹ А.К., Дерягин² П.А.

¹ Институт горного дела, геологии и геотехнологий, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. E-mail: KurchinGS@mail.ru

² Норильский филиал ООО «Институт Гипроникель», «Норильскпроект», Россия

Аннотация. Предложена методика расчета параметров буровзрывных работ при проведении подземных горных выработок, отличающаяся от существующих тем, что в ней расчет базируется не на определении удельного расхода ВВ, а на установлении радиуса зоны трещинообразования.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, буровзрывные работы, шпур, заряд, взрыв.

Введение

Одной из основополагающих проблем горного производства является разрушение горного массива. Буровзрывные работы являются первой ступенью в схеме технологических процессов как строительства горных выработок, так и добычи полезного ископаемого. Качество взрывной подготовки отбитой горной массы к погрузке оказывает существенное влияние на все последующие технологические процессы, связанные с добычей и переработкой минерального сырья. В зависимости от того, насколько корректно рассчитаны параметры БВР могут существенно изменяться технико-экономические показатели проходки горной выработки.

Основная часть

Как известно, при проведении горизонтальных горных выработок к буровзрывным работам предъявляют повышенные требования в части обеспечения требуемого развала породы после взрыва и качественного её дробления, высокой устойчивости выработок и оконтуривание их в соответствии с проектом.

В настоящее время большинство существующих методик расчета параметров БВР базируются на первоочередном определении удельного расхода ВВ. Недостатком этого подхода является использование в формулах расчета удельного расхода ВВ коэффициентов, имеющих весьма широкий диапазон изменения, и принимаемые их значения в большей мере зависят от уровня

подготовки и интуиции специалиста. В результате параметры БВР устанавливают по усредненным значениям, что отрицательно сказывается на эффективности взрывных работ.

Всё это вызвало необходимость иного подхода к расчёту параметров БВР и разработки соответствующей методики. В её основу было положено определение радиусов зоны смятия и трещинообразования согласно «новой теории разрушения горных пород удлинёнными зарядами ВВ», предложенной Б.Н. Кутузовым [1].

В настоящее время установлено, что при взрыве заряда ВВ в массиве образуется две зоны: зона смятия и зона трещин [2] (рис. 1).

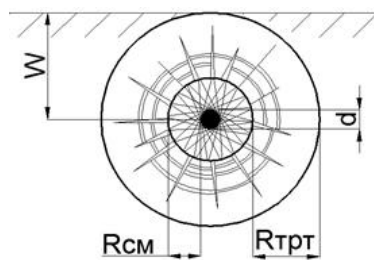


Рис. 1. Схема формирования радиуса зоны смятия и радиуса зоны трещинообразования: d – диаметр заряжаемого шпура (скважины); $R_{см}$ – радиус зоны смятия; $R_{тр}$ – радиус зоны трещинообразования; W – линия наименьшего сопротивления

Предлагаемая методика определения параметров БВР основана на достоверном определении радиусов этих двух зон и предполагает выполнение расчётов в следующей последовательности:

1. В зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий определяются показатели:

– величина радиуса зоны смятия определяется по формуле [1], м

$$R_{см} = d \sqrt{\frac{\rho \cdot D^2}{8 \cdot f \cdot 10^7}}, \quad (1)$$

где d – диаметр заряжаемого шпура (скважины), м; ρ – плотность ВВ в заряде, кг/м³; D – скорость детонации применяемого ВВ, м/с; f – коэффициент крепости по шкале М.М. Протодяконова;

– радиус зоны трещинообразования [1], м

$$R_{тр} = 0,2102 \cdot d \cdot \rho^{0,75} \cdot D^{1,5} \cdot \sigma_{сж}^{-0,25} \cdot \tau_{ср}^{-0,5} \cdot K_c^{-0,5}, \quad (2)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности пород на сжатие, Па; $\tau_{ср}$ – предел прочности пород на срез, Па; K_c – коэффициент структурного ослабления;

– коэффициент структурного ослабления согласно исследованиям [3] можно определить по формуле

$$K_c = \frac{1}{1 + (1/H_x)^{m_1} \cdot m_2 [\sin(2\alpha - p) - C/R] \cdot R^n \ln(1/H_x)^{-1}}, \quad (3)$$

где l – размер элементарного блока, образованного между плоскостями ослабления; H_x – максимальный размер трещиноватой модели; m_1, m_2, n – коэффициенты, численные значения которых следующие:

$$m_1 = -0,447; m_2 = 2,34 \cdot 10^{-5} \text{ и } n = 2,73;$$

ρ – угол внутреннего трения пород; C – сцепление на контактных поверхностях отдельностей, МПа; R – прочность на сжатие элементарного блока, МПа;

– линия наименьшего сопротивления [1], м

$$W = R_{тр} \cdot \cos(0,5 \cdot \alpha), \quad (4)$$

где α – минимальный угол образующей взрывной воронки, $\alpha = 60^\circ$.

Однако в этих формулах скорость детонации принимается по усредненным значениям, что отрицательно влияет на весь процесс БВР.

Ранее проведенными исследованиями [4–6] детонационной способности промышленных ВВ было установлено, что их детонационные характеристики напрямую связаны с диаметром заряжаемого шпура и плотности ВВ. На рис. 2 приведены зависимости, определенные зарубежны-

ми исследователями применительно к аммиачно-селитренным ВВ.

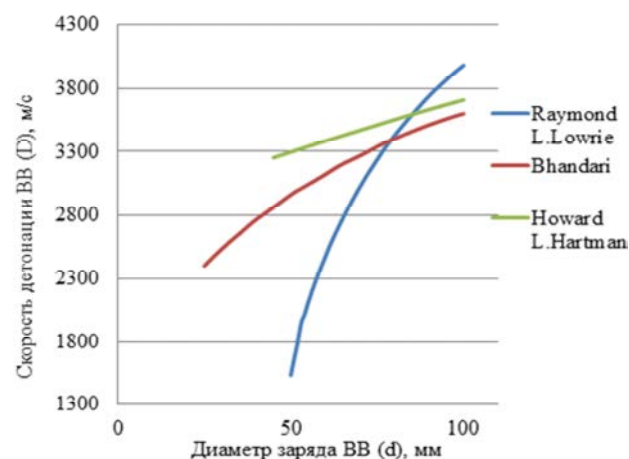


Рис. 2. Влияние диаметра заряда (d) на скорость детонации (D)

Исследованиями С.А. Калякина и К.Н. Лабинского [7] установлено, что на скорость детонации аммиачно-селитренных ВВ оказывают влияние не только диаметр заряда, но и плотность заряжания. На рис. 3 приведены зависимости, полученные с учетом данных, приведенных в работе [7].

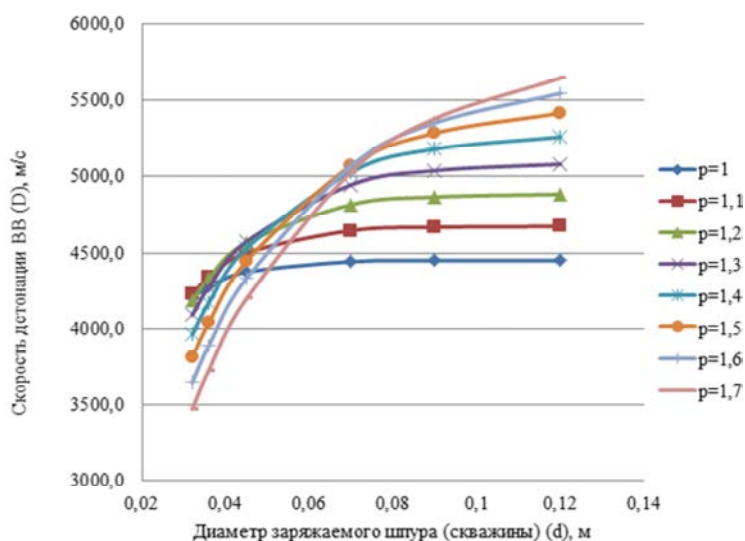


Рис. 3. Влияние диаметра заряда на скорость детонации с учетом плотности заряжания

Расчет скорости детонации аммиачно-селитренных ВВ с учетом влияния диаметра заряда и плотности ВВ производится по формуле, м/с

$$D = (11,794 \cdot \rho - 7080) \cdot d^{0,00057 \cdot p - 0,46}. \quad (8)$$

Подставив формулу (8) определения скорости детонации для аммиачно-селитренных ВВ в выражения (1) и (2), получим формулы для

определения радиусов зон смятия и трещинообразования:

$$R_{см} = d \sqrt{\frac{\rho \cdot ((11,794 \cdot \rho - 7080) \cdot d^{0,00057 \cdot \rho - 0,46})^2}{8 \cdot f \cdot 10^7}}; \quad (9)$$

$$R_{трт} = 0,2102 \cdot d \cdot \rho^{0,75} \cdot ((11,794 \cdot \rho - 7080) \cdot d^{0,00057 \cdot \rho - 0,46})^{1,5} \cdot \sigma_{сж}^{-0,25} \cdot \tau_{ср}^{-0,5} \cdot K_c^{-0,5}. \quad (10)$$

2. Графическое построение фронтальной проекции паспорта БВР начинают с построения линии расположения оконтуривающих шпуров. Для этого на расстоянии $R_{см}$ от контура выработки определяют точку нахождения первого шпура (рис. 4).

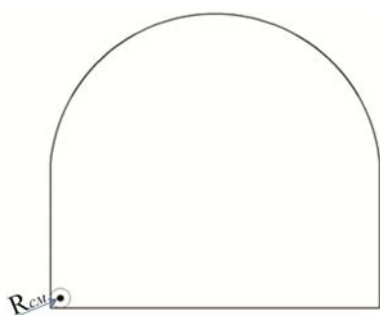


Рис. 4. Схема расположения первого шпура

После этого на расстоянии $R_{см}$ от проектного контура по всему периметру выработки располагают остальные оконтуривающие шпуры (рис. 5, а). Если число шпуров при расстановке их по линии оказывается не целым, то его округляют до ближайшего целого числа шпуров, а расстояние между шпурами пересчитывают так, чтобы расстояния между оконтуривающими шпурами, работающими в одинаковых условиях, были равными. Изменение расстояния от расчётного параметра допустимо не более чем на $\pm 10\%$.

Расстояние между оконтуривающими шпурами определяется величиной зоны трещинообразования $R_{трт}$. При этом в случае, если забой заряжается разными ВВ, зона $R_{трт}$ определяется для каждого типа заряда ВВ отдельно (рис. 5, б).

Расстояние между оконтуривающими и первым рядом вспомогательных шпуров определяется величиной ЛНС (рис. 6, а).

Расстояние между вспомогательными шпурами по горизонтали равно величине зоны трещинообразования (рис. 6, б). Если число шпуров при расстановке их по линии оказывается не целым, то его округляют до ближайшего целого числа шпуров, а расстояние между шпурами пересчитывают так, чтобы они были равными. Изменение расстояния от расчётного параметра допустимо в пределах $\pm 10\%$.

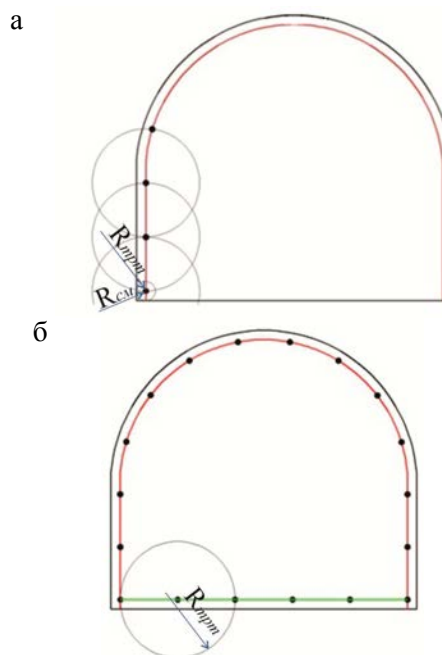


Рис. 5. Схема расположения оконтуривающих шпуров

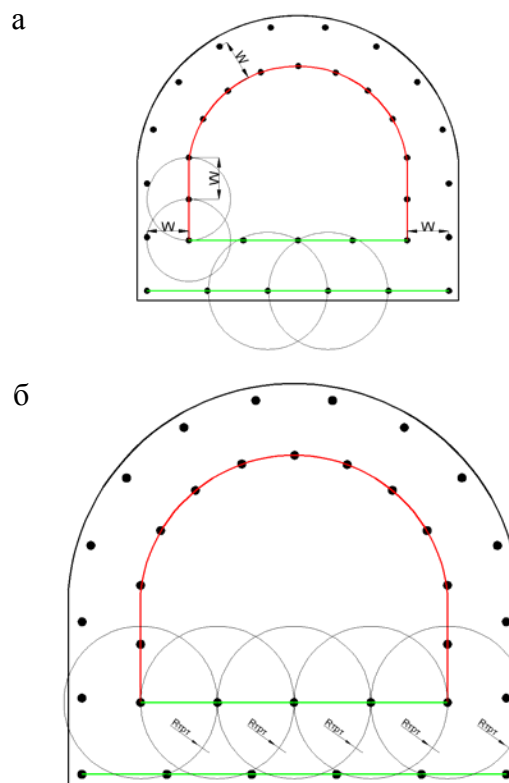


Рис. 6. Схема расположения первого ряда вспомогательных шпуров

С учетом этих параметров определяют расположение оконтуривающих и вспомогательных шпуров по сечению выработки.

3. В забоях с одной открытой поверхностью,

чтобы получить высокий коэффициент использования шпура (КИШ) при буровзрывной технологии проведения выработок, необходимо создать вторую открытую поверхность. Эту функцию выполняют врубовые шпуры.

Наиболее эффективными врубами, позволяющими обеспечить высокий КИШ, являются прямые врубы в сочетании с компенсационными скважинами. Как показала практика ведения взрывных работ на российских и зарубежных рудниках и шахтах, с увеличением диаметра компенсационной (незаряжаемой) скважины эффективность взрывных работ возрастает.

Количество компенсационных скважин и врубовых шпуров зависит от горно-геологических условий и площади поперечного сечения горных выработок. Наиболее распространенные диаметры компенсационных скважин: 76 и 102 мм, при этом их число изменяется от 1 до 4 шт. В отдельных случаях применяют компенсационные шпуры в количестве от 3 до 6 шт., диаметр их, как правило, такой же, как и заряжаемых шпуров.

Предлагаемый метод расчета конструкции прямого вруба состоит из нескольких операций, выполняемых в следующей последовательности:

В зависимости от условий отбойки вруб располагают по центру или смещают от оси выработки (вправо или влево). Затем производят расчёт параметров взрывного вруба и его построение (рис. 7):

– определяют число компенсационных (холостых) шпуров (скважин) во врубе, шт.

$$N_0 = \frac{0,5 \cdot l_0 - 0,2 \cdot d_0 \cdot l_0^2 + 1,3}{d_0 \cdot 0,08}, \quad (11)$$

где l_0 – длина холостого шпура (скважины), м; d_0 – диаметр холостого шпура (скважины), м;

– рассчитывают расстояние между холостыми шпурами (скважинами) вруба, м

$$h = d_0 + d - \frac{\pi \cdot d^2}{12 \cdot d_0}; \quad (12)$$

– расстояние между холостым и заряжаемым шпурами вруба составляет $(2 \div 3)d_0$;

– число заряжаемых врубовых шпуров, шт.

$$N_{вр} = \frac{0,04 \cdot S \cdot k_v}{\pi R_{см}^2}, \quad (13)$$

где S – площадь поперечного сечения, м²; k_v – коэффициент, учитывающий вязкость пород.

Глубина врубовых шпуров определяется возможностями технологического оборудования и, как правило, равна длине штанги. Глубина оконтуривающих и вспомогательных шпуров меньше врубовых примерно на 5–15%.

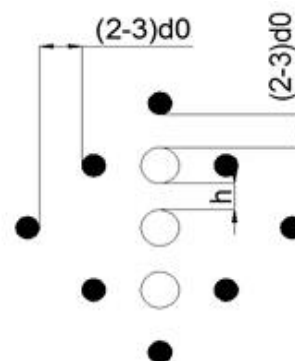


Рис. 7. Схема расположения компенсационных скважин и заряжаемых шпуров вруба

В случае, если одного ряда вспомогательных шпуров недостаточно и имеются участки, которые могут быть непроработаны, на расстоянии $R_{прт}$ располагают второй ряд вспомогательных шпуров (рис. 8).

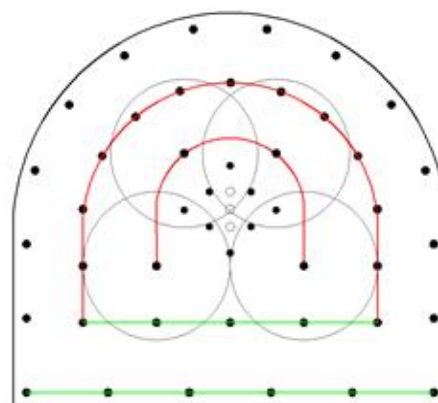


Рис. 8. Схема расположения врубовых шпуров и второго ряда оконтуривающих шпуров

И наоборот, в случае малого сечения выработки вспомогательные шпуры могут полностью отсутствовать.

4. Расчет конструкции шпуровых зарядов:

– длину заряда в шпуре определяют по формуле, м

$$L_3 = l_{ш} - 0,5W - l_{заб} - l_6, \quad (14)$$

где $l_{ш}$ – глубина шпура, м; $l_{заб}$ – длина забойки, м; l_6 – длина патрона-боевика м;

– строят конструкции зарядов для каждого варианта и типа ВВ (рис. 9);

– массу заряда в одном шпуре определяют по формуле, кг

$$Q_3 = \frac{L_3 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \rho}{4} \quad (15)$$

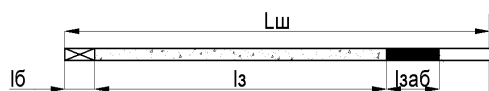


Рис. 9. Схема построения конструкции заряда

Заключение

Предлагаемая методика определения параметров БВР при проходке горных выработок прошла апробацию на 8 рудниках ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель», где результаты проведенных взрывов показали эффективность предлагаемой методики, что подтверждается сокращением как объемов бурения, так и расхода БВ.

Список литературы:

1. Кутузов Б.Н., Андриевский А.П. Новая теория и новые технологии разрушения горных пород удлиненными зарядами взрывчатых веществ. Новосибирск: Наука, 2002.
2. Кутузов Б.Н. Методы ведения горных работ. Ч.1. Разрушение горных пород взрывом: учебник для вузов. М.: Горная книга, 2007. 471 с.: ил. (Взрывное дело).
3. Рекомендации по определению механических свойств трещиноватого массива [web-сайт] // ООО «Международный Центр Качества». Режим доступа: <http://files.stroyinf.ru/Data1/53/53846/> (дата обращения: 10.04.2014).
4. Sushil Bhandari. 1997. Engineering rock blasting operations. Rotterdam, 375 p.
5. Raymond L.Lowrie. 2002. Mining Reference Handbook. Published by the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. 448 p.
6. Howard L.Hartman. 1992. SME Mining Engineering Handbook. 2nd Edition, vol. 1, 2268 p.
7. Калякин С.А., Лабинский К.Н. Исследование неидеальных режимов детонации промышленных БВ // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. Вип. 6/2009 (59). Ч. 1. С. 159–163.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

CALCULATION OF PARAMETERS OF DRILLING AND BLASTING OPERATIONS FOR HORIZONTAL AND INCLINE WORKING

Vokhmin Sergey Antonovich – Ph.D. (Eng.), Professor, Head of the Mine and Underground Construction Department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Kurchin Georgy Sergeevich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: KurchinGS@mail.ru.

Kirsanov Alexander Konstantinovich – Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: aka_sancho@mail.ru.

Deryagin Pavel Aleksandrovich – Chief Engineer of the Project, Norilsk Branch of Gipronickel Institute LLC, Institute Norilskproekt, Russia.

Abstract. The authors suggest a method for calculation of parameters of drilling and blasting operations for underground mine working which differs from existing ones in the fact that parameters are calculated not on a specific consumption of explosives, but on a radius of a fracture zone.

Keywords: explosive, drilling and blasting operations, blasthole, charge, explosion.

References

1. Kutuzov B.N., Andrievsky A.P. New theory and new technologies of rock destruction by linear charges of explosives. Novosibirsk: Nauka, 2002.
2. Kutuzov B.N. Mining techniques. P.1. Rock destruction by explosion: university textbook. Moscow: Mining Book Publishing House, 2007. 471 p.: ill. (Blasting).
3. Recommendations on determination of mechanical properties of rock mass fissuring [website]. LLC International Centre of the Quality. – Access mode: <http://files.stroyinf.ru/Data1/53/53846/> (accessed on 10 April 2014).
4. Sushil Bhandari. 1997. Engineering rock blasting operations. Rotterdam, 375 p.
5. Raymond L.Lowrie. 2002. Mining Reference Handbook. Published by the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. 448 p.
6. Howard L.Hartman. 1992. SME Mining Engineering Handbook. 2nd Edition, vol. 1. 2268 p.
7. Kalyakin S.A., Labinsky K.N. Study of non-ideal modes of industrial explosives detonation. Vestnik of Ostrogradsky Kremenchug State Polytechnical University, 2009, no. 6 (59), part 1, pp. 159–163.

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОГО ЗАКЛАДОЧНОГО МАССИВА ПРИ ВОСХОДЯЩЕМ ПОРЯДКЕ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Мешеряков Э.Ю.¹, Валеев А.С.², Аллабердин А.Б.¹

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

² Сибайский институт (филиал) ФГБУ ВПО «Башкирский государственный университет», Россия

Аннотация. Проведены исследования по определению параметров комбинированного закладочного массива при одновременном заполнении выработанного пространства камеры твердеющей и породной закладкой и восходящем порядке отработки месторождений. Установлены основные горно-геологические и горнотехнические факторы, влияющие на параметры искусственных целиков. В результате исследований построена номограмма для определения ширины твердеющей части комбинированного закладочного массива. Обоснован гранулометрический состав породной шихты, используемый для возведения комбинированного закладочного массива.

Ключевые слова: восходящий порядок отработки, комбинированный закладочный массив, технология формирования, камерная система разработки, ширина искусственного целика, породная шихта.

Введение

При восходящем порядке ведения горных работ закладка выработанного пространства является единственно возможным способом поддержания подработанного массива. Применение твердеющей смеси для закладки камеры характеризуется высокой себестоимостью закладочных работ, а использование породы в качестве закладки выработанного пространства — неспособностью к устойчивости при обнажении и значительной усадкой сформированного массива. В связи с этим предложена [1] технология формирования комбинированного закладочного массива, заключающаяся в том, что выработанное пространство одновременно заполняется сухой и твердеющей закладкой, при этом твердеющий массив создается на границе рудного массива сопряженной камеры и составляет порядка 30% от общего объема формируемого закладочного массива. Разработанный способ создания и сохранения устойчивости закладочного массива позволяет существенно снизить стоимость закладочных работ и обеспечить реализацию экологически безопасной технологии восходящей выемки за счет утилизации пустых пород из отвалов и проходческих работ.

Методика расчета параметров комбинированного закладочного массива

При ведении закладочных работ предложенной технологией необходимо обоснование параметров возводимого искусственного массива, которое сводится к обоснованию гранулометрического состава породной шихты, обеспечивающего минимальную усадку, и расчету требуемой ширины твердеющей части сохраняющего устойчивость при его обнажении.

Известно что, компрессионные свойства породной закладки зависят от ее пустотности, которая в свою очередь зависит от гранулометрического состава пород. Предшествующими исследованиями [2–5] установлено, что наибольшую плотность γ и, соответственно, наименьшую усадку λ имеют «двухмодальные» составы, в которых при наличии крупной $a_{\max}$ и мелкой $a_{\min}$ фракций отсутствуют средние.

В нашем случае размер крупной фракции регламентируется техническими возможностями оборудования, используемого для возведения комбинированного закладочного массива, и составляет 50 мм. Соблюдая условие $K_k = a_{\max}/a_{\min} \geq 4,5$, при котором породы укладываются более плотно, максимальный размер мелкой фракции составляет 10 мм.

Исходя из установленных размеров частиц, определяется объемное соотношение фракций. Для этого производится расчет пустотности дробленой породы крупного класса по формуле [3], кг/м³

$$V_{p1} = 1 - \frac{\gamma_{n1}}{\gamma_{m1}}, \quad (1)$$

где γ_{n1} , γ_{m1} — соответственно насыпная плотность пород крупного класса и пород в массиве, кг/м³.

Заполнение пустот V_{p1} породой мелкого класса объемом $V_2 = V_{p1}$ определит общую пустотность насыпи, кг/м³

$$V_{\Sigma} = V_2 \cdot \left(1 - \frac{\gamma_{n1}}{\gamma_{m2}}\right), \quad (2)$$

где γ_{n1} , γ_{m2} — соответственно плотность насыпная пород второго класса и пород в массиве, кг/м³.

При этом общая плотность полученной шихты определяется по формуле, кг/м³

$$\gamma_3 = \gamma_{n1} \cdot V_1 + \gamma_{n2} \cdot V_2. \quad (3)$$

Таким образом, используя вышеприведенную методику расчета гранулометрического состава пород, рекомендуется использовать породную шихту в соотношении 1:2 объема мелкой фракции (10 мм) к объему крупной фракции (50 мм), которая обеспечит высокие компрессионные свойства.

Исходя из конструкции комбинированного закладочного массива (рис. 1), твердеющая часть, по сути, является подпорной стенкой, которая испытывает боковое давление, оказываемого сыпучей породной закладкой [6]. Поэтому расчет нормативной ширины производится по методике расчета свободно опертой перемычки [7].

Предельное боковое давление сыпучей закладки [8], т/м²

$$P = \frac{\gamma \cdot S \cdot \sin \alpha}{p \cdot f_1}, \quad (4)$$

где γ – удельный вес закладки в разрыхленном состоянии, т/м³; S – площадь поперечного сечения камеры, м²; p – периметр сечения, м; f_1 – коэффициент трения сыпучей закладки о стенки камеры; α – угол наклона камеры, град.

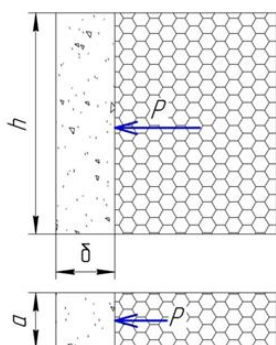


Рис. 1. Схема для расчета ширины искусственного целика

Максимальный изгибающий момент (Н·м) определяется либо по горизонтальному сечению твердеющего целика (M_1), либо – по вертикальному (M_2):

$$M_1 = \frac{Pa^2}{Y_1}; \quad (5)$$

$$M_2 = \frac{Ph^2}{Y_2},$$

где P – давление на искусственный целик МПа; a – ширина камеры, м; h – высота камеры, м; Y – табличный коэффициент [7].

Далее производится расчет момента сопротив-

ления целика [7], Н/м

$$W = \frac{M \cdot k}{m \cdot G_{\text{рас}}}, \quad (6)$$

где M – максимальный изгибающий момент твердеющего целика, Нм; k – коэффициент перегрузки, принимается $k = 1$; m – коэффициент условий работы, $m = 0,2$; $G_{\text{рас}}$ – нормативная прочность твердеющего целика на растяжение, МПа.

Нормативная прочность твердеющего целика на сжатие (МПа) определяется по формуле Ферэ [7]

$$G_{\text{сж}} = 2,5 \cdot \sqrt{(G_{\text{рас}})^3}, \quad (7)$$

где $G_{\text{сж}}$ – предельная прочность искусственного массива на сжатие, МПа.

Определив все промежуточные параметры, рассчитываем ширину искусственного монолитного целика [7], м

$$\delta = \sqrt{\frac{6W}{t}}, \quad (8)$$

где $t=h$ при определении W по M_1 ; $t=a$ при определении W по M_2 .

С целью оценки влияния горно-геологических и горнотехнических факторов на параметры комбинированного закладочного массива расчет производился по вышеизложенной методике для различных условий. Влияние каждого рассматривалось в отдельных случаях.

Высота камеры изменялась в пределах от 20 м до 100 м. Угол наклона камеры был принят равным 90° (при данном угле значение бокового давления максимально, то есть рассматривались наиболее опасные горно-геологические условия). Прочность твердеющей закладки на сжатие принималась равной 3 МПа. Расчеты производились для камеры шириной 10, 12, 15, 18, 20 м, требуемая ширина целика при этом уменьшалась незначительно, в пределах 1 м (рис. 2).

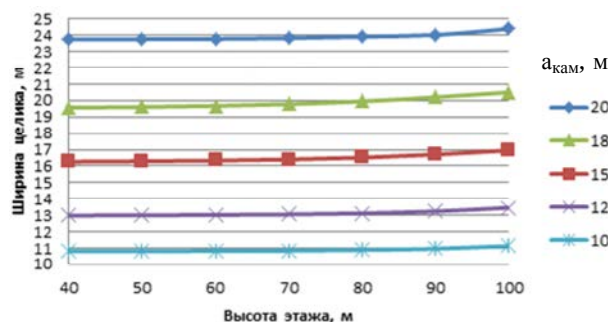


Рис. 2. Зависимость ширины целика от высоты камеры

На размеры искусственного целика влияет и угол наклона камеры. Рассматривался диапазон от 60 до 90°, что обусловлено областью применения камерных систем разработок. Расчеты показали, что уменьшение угла наклона камеры ведет и к снижению бокового давления, оказываемого породной закладкой. Это объясняется тем, что уменьшение угла, при неизменных других параметрах камеры, приводит к изменению геометрических размеров призмы сползания, за счет перемещения части веса сыпучей закладки на вмещающие породы, что в свою очередь обуславливает и уменьшение ширины целика (рис. 3).

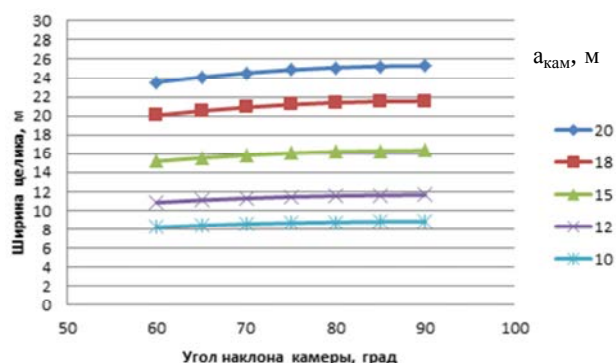


Рис. 3. Зависимость ширины целика от угла наклона камеры

Для определения степени влияния мощности рудного тела (ширины камеры) на ширину искусственного целика были произведены расчеты для камеры с условными значениями высоты ($H = \text{const} = 60$ м) и значением предела прочности целика на сжатие ($G_{\text{сж}} = \text{const} = 3$ МПа). Полученные результаты объединены на графике (рис. 4).

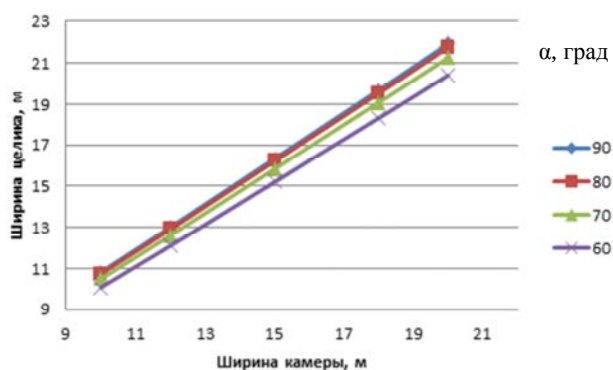


Рис. 4. Зависимость ширины целика от ширины камеры

Как видно из графика, наблюдается прямая зависимость одного параметра от другого. Так, например, уменьшение ширины камеры с 20 до 10 м приводит к уменьшению ширины целика

на 50%.

С целью установления влияния прочности целика на его ширину были произведены расчеты при изменении прочности и постоянных значениях высоты и угла наклона ($H = 60$, $\alpha = 90$), полученные результаты объединены в графике и представлены на рис. 5.

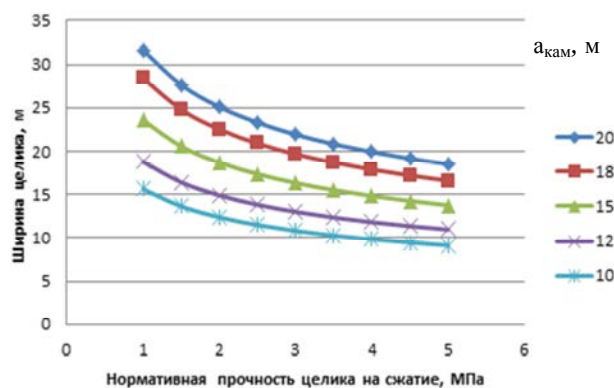


Рис. 5. Зависимость ширины целика от его предела прочности на сжатие

В результате расчетов ширины искусственного целика при различных горно-геологических и горнотехнических условиях на основе полученных графиков построена номограмма (рис. 6), позволяющая определить требуемые параметры искусственного целика без аналитических расчетов.

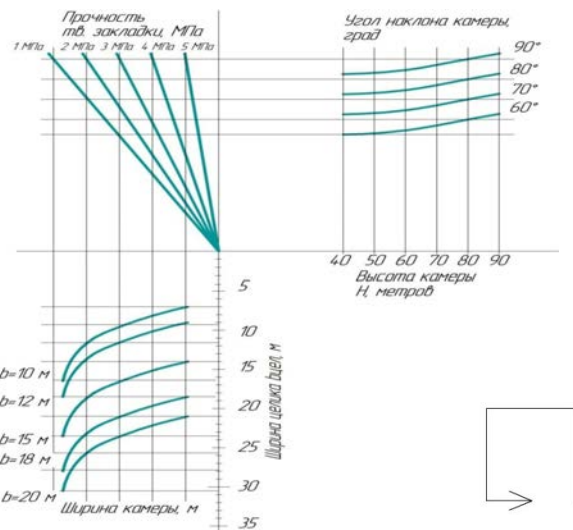


Рис. 6. Номограмма для определения ширины искусственного целика

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований обоснованы параметры комбинированного закладочного массива, возводимого при восходящем порядке отработки месторождений. В

частности, определен гранулометрический состав породной шихты двухмодального состава, обеспечивающий наименьший коэффициент усадки. Получены зависимости ширины твердеющей части комбинированного закладочного массива от горно-геологических и горнотехнических условий. Результаты объединены в номограмму, позволяющую графическим способом определить параметры закладочного массива, обеспечивающие его устойчивость при обнажении.

Список литературы

1. Мещеряков Э.Ю., Аллабердин А.Б. Метод формирования комбинированного закладочного массива при камерной системе разработки крутопадающих рудных тел малой и средней мощности на глубоких горизонтах // Условия устойчивого функционирования минерально-сырьевого комплекса России. Вып. 1: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2014. №10. С. 118–123.

2. Герасименко О.Г. Исследование свойств сухой породной закладки и выбор рациональной технологии закладочных работ (на примере Джезказганского месторождения): дис. ... канд. техн. наук. Алма-Ата, 1974. 188 с.
3. Коган Я.Л. Сжимаемость крупнообломочных пород под большими нагрузками // Гидротехническое строительство. 1966. №9. С. 12–15.
4. Светлаков К.Н., Атамских С.А. Техника и технология ведения закладочных работ на рудниках цветной металлургии // ЦНИИцветмет экономики и информации. 1980. 39 с.
5. Мещеряков Э.Ю. Совершенствование способа управления состоянием прикарьерного массива при подземной разработке ценных руд: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск: МГТУ, 1998.
6. Исследование физико-механических свойств отходов обогащения для разработки технологии формирования закладочного массива в выработанном пространстве карьера «Учалинский» / Калмыков В.Н., Зотеев О.В., Зубков Ан.А., Гоготин А.А., Зубков А.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №4. С. 11–19.
7. Закладочные работы в шахтах: справочник / под ред. Д.М. Бронникова, М.Н. Цыгалова. М.: Недра, 1989. 400 с.
8. Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов. М.: Машиностроение, 1964.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

RATIONALE FOR PARAMETERS OF A COMBINED FILLING MASS IN ASCENDING EXPLOITATION MINING

Meshcheryakov Eduard Yurievich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: ntc@magtu.ru

Valeev Azat Salimyanovich – D.Sc. (Education), Ph.D. (Eng.), Professor, Sibai Institute (Branch) of the Bashkir State University, Bashkortostan. E-mail: Valeev_as@mail.ru

Allaberдин Azamat Bulyakovich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 (3519) 298 461, 298 466. E-mail: Allaberдинazamat@mail.ru

Abstract. We studied parameters of a combined filling mass during both solid stowing and rockfill of a chamber and ascending exploitation mining of deposits. We determined main mining and geological and mine engineering factors influencing parameters of artificial pillars. The studies resulted in a nomograph used to determine a width of a solid part of the combined filling mass. A grain composition of the mix of rocks used in a combined filling mass is justified.

Keywords: ascending exploitation mining, combined filling mass, forming technology, chamber mining, width of an artificial pillar, mix of rocks.

References

1. Meshcheryakov E.Yu., Allaberдин A.B. A method of forming a combined filling mass in chamber mining of steeply deeping ore bodies of the low and average capacity at deep horizons. *Usloviya ustoychivogo funktsionirovaniya mineralno-syrevogo kompleksa Rossii* [Conditions for sustainable functioning of a mineral resources sector of Russia]. Issue 1 (special issue): *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. Separate articles. 2014, no. 10, pp. 118–123.

2. Gerasimenko O.G. Study of dry rockfill properties and selection of a reasonable technology of filling operations (by the example of the Dzhezkazgan deposit). Ph.D. dissertation. Alma-Ata, 1974, 188 p.
3. Kogan Ya.L. Compressibility of coarse rocks under high loads. *Hydraulic Engineering*. 1966, no. 9, pp. 12–15.
4. Svetlakov K.N., Atmanskikh S.A. Technique and technology of filling operations at mines in the non-ferrous metallurgy. *TsNIITsvetmet of economy and information*. 1980. 39 p.
5. Meshcheryakov E.Yu. *Improving the method for controlling a state of a mass near a pit in underground mining of valuable ores. PhD dissertation*. Magnitogorsk, MGTU, 1998.
6. Kalmykov V.N., Zoteev O.V., Zubkov An.A., Gogotin A.A., Zubkov A.A.. Study of physical and mechanical properties of tailings to develop the technology of forming a filling mass in the goaf of the Uchalinsky open pit. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 4, pp. 11–19.
7. Backfilling in mines: a Handbook. Ed. by D.M. Bronnikov, M.N. Tsygalov. Moscow: Nedra, 1989, 400 p.
8. Zenkov R.L. *Mekhanika nasypnykh грузов* [Mechanics of bulk cargo]. Moscow: Engineering, 1964.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КАНАТНЫХ ПИЛ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОТДЕЛЕНИЯ МОНОЛИТОВ ПРИРОДНОГО КАМНЯ ОТ МАССИВА

Першин Г.Д., Уляков М.С.

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

Аннотация. Приведены зависимости основных показателей процесса резания (производительность, расход энергии и алмазного инструмента) от режима работы канатной пилы при различной высоте добычного уступа. Разработана методика выбора рационального режима управления канатной пилой, учитывающая установленные зависимости производительности отделения монолита от массива и эксплуатационные затраты на его отделение в зависимости от высоты уступа. Для возможности выбора рационального режима управления канатной пилой предложен комплексный технико-экономический показатель (C_w), характеризующий затратами, отнесенными к интенсивности отделения объемов камня от массива.

Ключевые слова: канатная пила, производительность, расход инструмента, удельная работа резания, себестоимость.

Введение

Добычные горные машины с гибким режущим инструментом к настоящему времени на каменных карьерах всего мира получили доминирующее положение. Это связано с возможностью выпиливать из массива породы монолиты больших размеров (свыше 500 м³), необходимость в которых обусловлена повышением выхода товарных блоков на трещиноватых месторождениях. Применение на данных машинах канатно-алмазного инструмента позволило вести добычные работы и на высокопрочных месторождениях природного камня (породы типа гранит). Разработка и применение на карьерах канатно-алмазных пил (такое название утвердилось у горняков) взамен ранее применяемых канатно-абразивных пил, где в качестве абразивной пульпы использовался кварцевый песок с водой, позволило повысить производительность резания в десять и более раз на породах средней прочности и расширить диапазон прочности добываемого камня до уровня гранитов, долеритов и т. д.

К началу двадцатого века канатно-абразивные пилы безвозвратно ушли в прошлое, и поэтому нет необходимости современные горные машины с гибким режущим рабочим органом называть как канатно-алмазные пилы, выделяя алмазный инструмент по отношению к абразивному, который уже не применяется в настоящий период времени.

Отделение больших по объему монолитов камня предполагает применение высокоуступной технологии отработки месторождения, когда все линейные параметры монолита обосновываются по условию максимального выхода товарных блоков в зависимости от природной трещиноватости массива [1, 2]. Независимо от прочно-

сти камня теоретическими исследованиями и практикой обоснована двухстадийная схема добычи товарных блоков, когда на первой, самой трудоемкой, стадии отделяется монолит обоснованных размеров с помощью канатных пил (КП). На второй стадии монолит разделяется на товарные блоки различными способами и реализующими их техническими средствами в зависимости от прочности камня. Для пород типа мрамор применяют баровые камнерезные машины, либо пассировочные КП для окварцованных месторождений. На породах типа гранит используется шпуровой способ с применением клиньев (механических, гидравлических), а также невзрывчатых разрушающих составов (НРС).

Цель данной работы заключается в исследовании влияния режимов работы КП на основные технико-экономические показатели процесса отделения монолитов камня от породного массива.

Основная часть

На технико-экономические показатели отделения монолита от массива влияют его линейные размеры (Н, L, В), режимы работы КП и прочность камня. Экономическая оценка работы КП производится с учетом производительности резания, удельного расхода электроэнергии и алмазного инструмента. Удельные эксплуатационные затраты (руб./м²) на отделение монолита от массива с помощью КП при этом определяются по зависимости

$$C_s = \frac{C_0}{K_{uo} \cdot \Pi} + b \cdot A \cdot C_z + b \cdot R \cdot \gamma_a \cdot C_u, \quad (1)$$

где C_0 , C_z , C_u – стоимости соответственно работы канатной пилы (руб./ч), электроэнергии (руб./кВт·ч), алмазного инструмента (руб./карат);

$K_{uo}=0,75$ – расчетный коэффициент использования КП во времени; P – техническая производительность КП, м²/с; b – ширина пропила (диаметр алмазорежущей втулки гибкого инструмента), м; A – удельная работа резания, Дж/м³; R – удельный расход алмазного инструмента, м³/м³; γ_a – содержание алмазов в единице объема алмазосодержащего слоя инструмента, карат/м³.

Первое слагаемое уравнения представляет затраты на амортизационные отчисления камнерезного оборудования с учетом затрат на обслуживание и ремонт и заработную плату оператору КП $C_{AO+ЗП}$; второе слагаемое – это затраты на электроэнергию, потребляемую двигателем в процессе резания $C_{ЭЭ}$, а третье – затраты, связанные с расходом алмазного инструмента $C_{АИ}$.

Применяются две схемы управления работой КП. В первой из схем через задание на пульте управления силы тока определенной величины выдерживается постоянная мощность главного привода ($N=const$), но изменяется скорость подачи тележки машины ($V_n=var$). Существующая обратная связь отслеживает изменение мощности энергии основного двигателя и сводит это изменение к нулю за счет увеличения или уменьшения скорости вращения двигателя механизма подачи. С изменением скорости подачи пропорционально изменяется и силовой режим резания, т. е. величина контактного давления инструмента на породу ($\sigma_n=var$). Во второй схеме – тележке КП путем использования реостата в электрической схеме привода подачи задается постоянная скорость перемещения ($V_n=const$). При этом на пульте управления амперметр показывает силу тока на главном приводе машины. Так как в режиме постоянной скорости подачи обеспечивается неизменным контактное давление инструмента на породу ($\sigma_n=const$), то величина силы тока будет изменяться прямо пропорционально изменению длины контакта инструмента с породой, что вызывает аналогичное изменение мощности энергии главного привода КП.

Как видим, применяемые схемы управления работой КП влияют только на силовой режим резания. По первой схеме силовой режим переменный во времени, во второй схеме – постоянный. Силовой режим определяет и производительность резания, и мощность главного привода камнерезной машины, влияющие на расход дорогостоящего алмазного инструмента и удельное энергопотребление. Среди технико-экономических показателей любой камнерезной машины определяющим является производительность (так как остальные показатели во многом производны от нее). Применительно к существующим схемам управления работой КП рассмотрим методики оценки производительности, энергопотребления и расхода алмазного инструмента.

В случае применения схемы управления с постоянной скоростью подачи средняя производительность КП рассчитывается согласно работе [3]:

$$P_V^{cp} = K_m \cdot P_V^{max}, \quad (2)$$

где $K_m < 1$ – коэффициент влияния геометрии плоскости отделения монолита на среднюю производительность резания от ее максимального значения.

Максимальная производительность определяется выражением [3]

$$P_V^{max} = \frac{N}{b \cdot 820} \cdot \left(\frac{2 \cdot N}{\mu_{pac} \cdot k_n \cdot b \cdot (\pi + \varphi_0) \cdot h_{np} \cdot V_p} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

где h_{np} – высота пропила, м; φ_0 – дополнительный угол охвата, рад; μ_{pac} и k_n – коэффициенты распиловки и прерывистости режущей поверхности; b – диаметр режущей втулки, м; V_p – скорость распиловки (скорость движения гибкого режущего органа), м/с.

Для продольного пропила ($k_\phi = L/H > 1$), $h_{np} = H_y$, h_{np} значение коэффициента K_m^{np} рассчитывается по формуле

$$K_m^{np} = \frac{k_\phi}{\left(k_\phi + 0,75 - 0,643 \cdot (D_{шк} / H_y) \right)}, \quad (4)$$

где $D_{шк}$ – диаметр ведущего шкива, м; H_y – высота уступа, м.

Для поперечного пропила, отделяющего монолит камня от массива, выполняется условие $k_\phi = B/H \leq 1$. В этом случае максимальная высота пропила не равна высоте уступа и находится из уравнения

$$h_{np} = \frac{H_y \cdot k_\phi \cdot \left(2 - k_\phi - \frac{D_{шк}}{2 \cdot H_y} \right)}{\left(1 - \frac{D_{шк}}{2 \cdot H_y} \right)}, \quad (5)$$

что в итоге определяет расчетную величину коэффициента K_m^n для поперечного пропила:

$$K_m^n = \frac{\left(2 - \frac{D_{шк}}{H_y} \right) \cdot \left(4 - 2 \cdot k_\phi - \frac{D_{шк}}{H_y} \right)}{\left(k_\phi + 0,75 - 0,643 \cdot \frac{D_{шк}}{H_y} \right)}. \quad (6)$$

Зависимость производительности КП, соответствующей схеме управления ею в режиме по-

стоянной мощности резания, когда $k_\phi = B/H \leq 1$, определяется по выражению [3]

$$P_N = \frac{N}{820 \cdot b} \cdot \left(\frac{2 \cdot N}{\mu_{pac} \cdot k_n \cdot b \cdot V_p} \right)^{0,5} \cdot \left[\left(\frac{1}{\pi \cdot D_{шк}} \right)^{0,5} - \left(\frac{1}{(\pi + \varphi_\phi) \cdot h_{np}} \right)^{0,5} \right]. \quad (7)$$

При отделении монолита по продольной плоскости ($k_\phi = L/H > 1$, $h_{np} = H_y$) необходимо учитывать стационарность процесса пиления по отношению к длине контакта инструмента с породой. В этом случае производительность в режиме постоянной мощности находится как средневзвешенная величина

$$P_N^{cp} = \frac{(P_N \cdot t_{нест} + P_V^{max} \cdot t_{cm})}{(t_{нест} + t_{cm})}, \quad (8)$$

где $t_{нест} = (k_\phi \cdot H_y^2 - 0,5 \cdot (k_\phi - 1) \cdot H_y^2) / P_N$ – время нестационарного пиления плоскости отделения, ч; $t_{cm} = (0,5 \cdot (k_\phi - 1) \cdot H_y^2) / P_V^{max}$ – время стационарного пиления плоскости отделения, ч.

Отношение производительностей при двух режимах для $k_\phi \leq 1$ запишется в виде

$$\frac{P_N}{P_V} = \frac{1}{K_m^n} \cdot \left[\left(\frac{(\pi + \varphi_\phi) \cdot h_{np}}{\pi \cdot D_{шк}} \right)^{0,5} - 1 \right], \quad (9)$$

а для $k_\phi > 1$

$$\frac{P_N^{cp}}{P_V^{cp}} = \frac{(2 \cdot k_\phi \cdot P_N)}{K_m^{np} \cdot ((k_\phi + 1) \cdot P_V^{max} + (k_\phi - 1) \cdot P_N)}. \quad (10)$$

На рис. 1 представлено отношение производительностей резания КП (9), (10), управляемой по рассмотренным выше силовым режимам.

При этом, начиная с высоты уступа 2–4 м, производительность резания в режиме $N=const$ по отношению к режиму $V_{II}=const$ возрастает по степенной зависимости в соответствии с формой плоскости отделения.

Для реализации алмазосберегающего режима распиловки необходимо, чтобы $\sigma_n^{min} \rightarrow \sigma_n^{on}$ (т. е. отвечало условию минимального удельного расхода алмазного инструмента), где σ_n^{min} – величина контактного нормального напряжения [3], когда в процессе резания выдерживается постоянная скорость подачи (рис. 2).

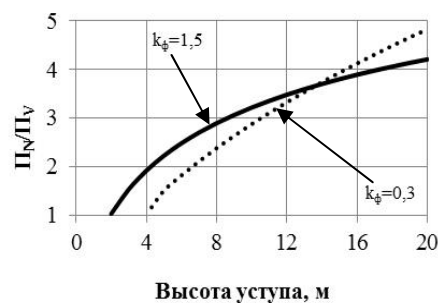


Рис. 1. Зависимость отношения производительностей резания при различных режимах работы КП от высоты уступа

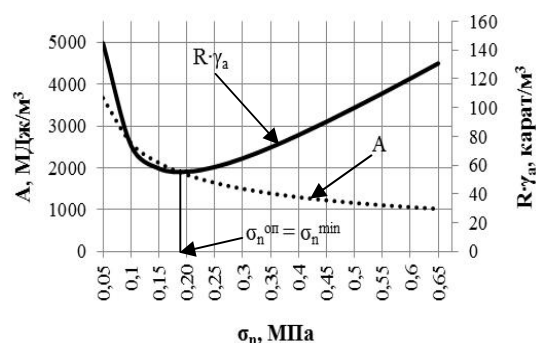


Рис. 2. Зависимости удельного расхода R алмазного инструмента и удельной работы резания A от нормального контактного давления σ_n для пород с $\sigma_{сж}=100–120$ МПа

Реализуемое в процессе резания энергопотребление A для расчета удельных затрат по формуле (1) определяется для режима работы КП с постоянной скоростью подачи следующим образом [3]:

$$A_v = \frac{K}{\sqrt{\sigma_n^{min}}}. \quad (11)$$

Для режима постоянной мощности резания удельное энергопотребление в случае $k_\phi \leq 1$ находится как средняя интегральная величина по следующей зависимости:

$$A_N = \frac{(2 \cdot K \cdot (\sqrt{\sigma_n^{max}} - \sqrt{\sigma_n^{min}}))}{(\sigma_n^{max} - \sigma_n^{min})}, \quad (12)$$

где σ_n^{max} – максимальное значение нормального напряжения, соответствующее минимальной длине контакта инструмента с породой, Па [3].

При отделении монолита по продольной плоскости ($k_\phi > 1$) удельная работа резания в режиме постоянной мощности находится как средневзвешенная величина:

$$A_N^{cp} = \frac{(A_N \cdot t_{нест} + A_v \cdot t_{cm})}{(t_{нест} + t_{cm})}. \quad (13)$$

Отношение удельных работ резания при двух режимах для поперечной плоскости отделения запишется в следующем виде:

$$\frac{A_N}{A_V} = \frac{\left(2 \cdot \sqrt{\sigma_n^{\min}} \cdot \left(\sqrt{\sigma_n^{\max}} - \sqrt{\sigma_n^{\min}}\right)\right)}{(\sigma_n^{\max} - \sigma_n^{\min})}, \quad (14)$$

а для продольной плоскости отделения

$$\frac{A_N^{cp}}{A_V} = \frac{\left(\sqrt{\sigma_n^{\min}} \cdot (A_N \cdot t_{нест} + A_V \cdot t_{см})\right)}{(K \cdot (t_{нест} + t_{см}))}. \quad (15)$$

На рис. 3 в графическом виде показаны зависимости (14) и (15). Расчеты в данном случае выполнены при следующих данных: $N=25,47$ кВт, $\mu_{рас}=0,25$, $k_n=0,16$, $b=0,01$ м, $D_{уик}=0,8$ м, $V_p=30$ м/с.

Средняя удельная работа резания (в режиме $N=const$) по отношению к удельной работе резания, соответствующей

$\sigma_n^{\min} = \sigma_n^{он}$ (в режиме $V_{II}=const$), возрастает в соответствии с формой плоскости отделения (см. рис. 3).

Удельный расход алмазного инструмента R , как и удельная работа резания A , может быть получен на основе стендовых испытаний. Для дальнейших расчетов были приняты экспериментальные данные канд. техн. наук К.Г. Лусиняна по резанию алмазным инструментом природного камня различной прочности [4]. В результате обработки экспериментальных точек получена следующая аппроксимирующая зависимость R от σ_n :

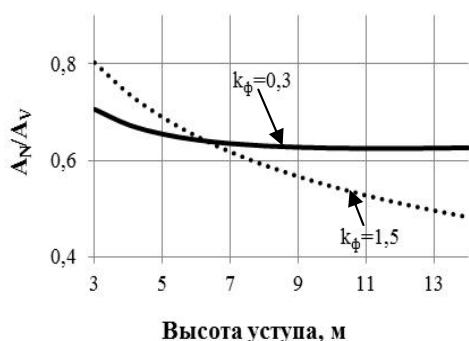


Рис. 3. Зависимость отношения среднего (в режиме $N=const$) и соответствующего $\sigma_n^{\min} = \sigma_n^{он}$ (в режиме $V_n=const$) значений удельной работы резания от высоты уступа

$$R = r_0 + \frac{r_1}{\sigma_n} + r_2 \cdot \sigma_n, \quad (16)$$

решение которой при условии $\partial R / \partial \sigma_n = 0$ дает оптимальное контактное давление $\sigma_n^{он} = \sqrt{r_1 / r_2}$. Его подстановка в (16) и определяет расход алмазного инструмента в режиме $V_{II}=const$:

$$R_V^{\min} = r_0 + \frac{r_1}{\sqrt{r_1 / r_2}} + r_2 \cdot \sqrt{r_1 / r_2}. \quad (17)$$

Численные значения аппроксимирующих коэффициентов $r_0 = -1,46 \cdot 10^{-5}$, $r_1 = 0,376 \cdot 10^{-5}$ МПа, $r_2 = 10,5 \cdot 10^{-5}$ 1/МПа были получены при резании природного камня с $\sigma_{сж} = 120-140$ МПа. Для режима $N=const$ удельный расход может быть получен как средняя интегральная величина:

$$R_N = \frac{r_0 \cdot (\sigma_n^{\max} - \sigma_n^{\min}) + r_1 \cdot \ln \frac{\sigma_n^{\max}}{\sigma_n^{\min}} + 0,5 \cdot r_2 \cdot \left((\sigma_n^{\max})^2 - (\sigma_n^{\min})^2\right)}{\sigma_n^{\max} - \sigma_n^{\min}}. \quad (18)$$

Тогда их отношение для поперечной плоскости отделения запишется в следующем виде:

$$\frac{R_N}{R_V^{\min}} = \frac{r_0 \cdot (\sigma_n^{\max} - \sigma_n^{\min}) + r_1 \cdot \ln \frac{\sigma_n^{\max}}{\sigma_n^{\min}} + 0,5 \cdot r_2 \cdot \left((\sigma_n^{\max})^2 - (\sigma_n^{\min})^2\right)}{(\sigma_n^{\max} - \sigma_n^{\min}) \cdot \left(r_0 + \frac{r_1}{\sqrt{r_1 / r_2}} + r_2 \cdot \sqrt{r_1 / r_2}\right)}. \quad (19)$$

При отделении монолита по продольной плоскости удельный расход инструмента в режиме постоянной мощности находится как средневзвешенная величина:

$$R_N^{cp} = \frac{(R_N \cdot t_{нест} + R_V^{\min} \cdot t_{см})}{(t_{нест} + t_{см})}. \quad (20)$$

Тогда отношение удельных расходов инструмента при двух режимах для продольной плоскости отделения запишется в виде

$$\frac{R_N^{cp}}{R_V^{\min}} = \frac{R_N \cdot t_{нест} + R_V^{\min} \cdot t_{см}}{(t_{нест} + t_{см}) \cdot \left(r_0 + \frac{r_1}{\sqrt{r_1 / r_2}} + r_2 \cdot \sqrt{r_1 / r_2}\right)}. \quad (21)$$

На рис. 4 в графическом виде показаны зависимости (20) и (21) при различном значении коэффициента k_{ϕ} .

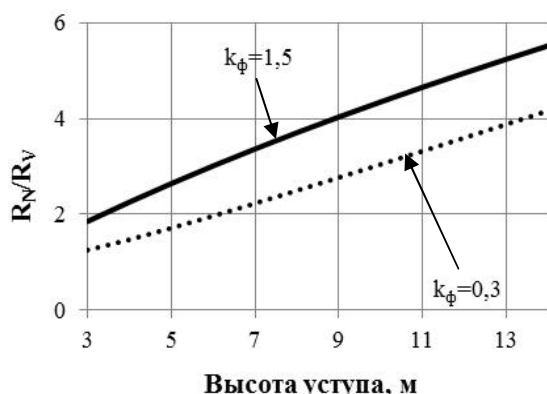


Рис. 4. Зависимость отношения среднего (в режиме $N=const$) и минимального (в режиме $V_{п}=const$) значений удельного расхода алмазного инструмента от высоты уступа

Среднее значение удельного расхода алмазного инструмента (в режиме $N=const$) по отношению к минимальному (в режиме $V_{п}=const$) возрастает в соответствии с формой плоскости отделения (см. рис. 4).

Экономические показатели при различных параметрах и режимах распиловки алмазноканатным инструментом гранодиорита Нижне-Санарского месторождения (линейные размеры монолита: $H_{м}=5,6$ м, $L_{м}=8,4$ м, $B_{м}=1,7$ м) приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Расчетные параметры и технико-экономические показатели работы КП в режиме $V_{п}=const$

Режим	$V_{п}=const, \sigma_n=const, \sigma_n^{min}=0,2$ МПа, $A=1833,58$ МДж/м ³		
Вид плоскости отделения (K_{ϕ})	Горизонтальная (0,2)	Поперечная (0,3)	Продольная (1,5)
N^{max} , кВт	8,24	12,18	25,47
$R^{min} \cdot \gamma_a$, карат/м ³	55,31		
K_m	0,63	0,60	0,70
P^{max} , м ² /ч	1,62	2,39	5,00
P^{cp} , м ² /ч	1,01	1,42	3,48
$N_{уд}$, кВт·ч/м ²	18,34		
$C_{AO+3П}$, руб./м ²	391,69	279,69	114,36
$C_{эз}$, руб./м ²	15,80		
C_{AI} , руб./м ²	158,07		
C_s , руб./м ²	565,56	453,56	288,23
S , м ²	14,11	9,41	47,04
$t_{пиления}$, ч	14,1	6,7	13,5
$\sum t_{пиления}$, ч	34,4		
C , тыс. руб.	7,98	4,27	13,56
$\sum C$ (по монолиту), тыс. руб.	25,81		

Таблица 2

Расчетные параметры и технико-экономические показатели работы КП в режиме $N=const$

Режим	$N=const, \sigma_n=var$		
Вид плоскости отделения (K_{ϕ})	Горизонтальная (0,2)	Поперечная (0,3)	Продольная (1,5)
N , кВт	8,24	12,18	25,47
σ_n^{max} , МПа	0,57	0,81	1,69
A^{cp} , МДж/м ³	1364,34	1219,42	1185,90
$R \cdot \gamma_a$, карат/м ³	78,21	103,20	158,61
P , м ² /ч	1,10	2,41	8,28
$N_{уд}$, кВт·ч/м ²	13,64	12,19	11,86
$C_{AO+3П}$, руб./м ²	362,96	165,00	47,99
$C_{эз}$, руб./м ²	11,75	10,51	10,22
C_{AI} , руб./м ²	223,54	294,94	453,30
C_s , руб./м ²	598,26	470,45	511,51
$t_{пиления}$, ч	13,0	4,0	5,7
$\sum t_{пиления}$, ч	22,7		
C , тыс. руб.	8,44	4,43	24,06
$\sum C$ (по монолиту), тыс. руб.	36,93		

Время, затраченное на резание плоскостей, для условий Юго-Восточного участка Нижне-Санарского месторождения гранодиоритов в случае работы КП в режиме $N=const$ в 1,5 раза меньше, чем в режиме $V_{п}=const$. Результаты оценки доли пиления во всем процессе подготовки камня к выемке в зависимости от режима работы КП приведены в табл. 3.

Таблица 3

Доля времени выполнения пропилов КП в процессе подготовки к выемке гранодиорита Нижне-Санарского месторождения при различных режимах резания

Вид работ	Время выполнения, ч	
	$V_{п}=const, \sigma_n=const$	$N=const, \sigma_n=var$
Бурение горизонтальной продольной скважины (8,4 м)	3,5	
Поиск отметок для стыковки скважин	3,0	
Бурение горизонтальной поперечной скважины (1,7 м)	2,0	
Горизонтальный пропил КП (14,28 м ²)	14,14	13,0
Поиск отметок для стыковки скважин	3,0	
Бурение вертикальной скважины (5,6 м)	2,5	
Вертикальный поперечный пропил КП (9,52 м ²)	6,70	4,0
Вертикальный продольный пропил КП (47,04 м ²)	13,52	5,68
Отсыпка подушки	0,5	
Опрокидывание монолита на рабочую площадку	3,0	
Разделка опрокинутого монолита и пасировка блоков шпуровым способом с применением механических клиньев	4,0	
Время подготовки к выемке блоков природного камня, ч	55,9	44,1
Время пиления, ч (в % от общего)	34,4 (61,5%)	22,7 (51,5%)

Таким образом, время, затраченное на выполнение пропилов КП, в процессе подготовки к выемке камня занимает 51,5 и 61,5% для режимов $N=const$ и $V_{II}=const$ соответственно.

По формуле (1) были рассчитаны удельные эксплуатационные затраты на резание плоскостей отделения монолита от массива. Это позволило представить в графическом виде отношения удельных эксплуатационных затрат при различных режимах работы КП от высоты уступа (рис. 5).

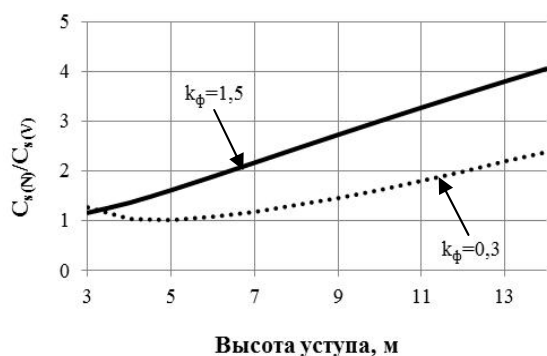


Рис. 5. Зависимость отношения удельных эксплуатационных затрат на резание плоскостей при различных режимах работы КП от высоты уступа

Удельные эксплуатационные затраты на резание плоскостей в режиме $N=const$ по отношению к режиму $V_{II}=const$ возрастают, начиная с высоты уступа 4,5 м (см. рис. 5, 6) в соответствии с формой плоскости отделения. Так, при высоте уступа $H_y^{on}=5,6$ м отношение значений себестоимости $C_{s(N)}/C_{s(V)}$ составляет 1,0–1,8 в зависимости от величины коэффициента k_{ϕ} .

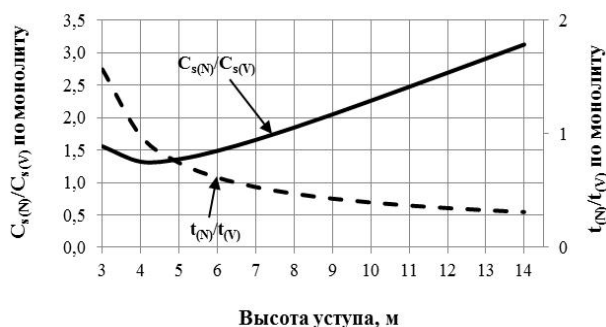


Рис. 6. Зависимость отношения удельных эксплуатационных затрат на резание плоскостей и времени, затраченного на пиление (по монолиту) при различных режимах работы КП от высоты уступа

Основным результатом проведенных исследований и полученных зависимостей (1), (9), (10), (14), (15), (19), (21) влияния силового режима на технико-экономические показатели является вывод о неоднозначном вкладе в эксплуатаци-

онные затраты производительности, энергопотребления и расхода алмазного инструмента при резании. Так как силовой режим в пределах заданной мощности главного привода канатной пилы связан с высотой пропила (уступа), то с практических позиций целесообразнее полученные технико-экономические показатели представлять в виде функциональных зависимостей от высоты уступа для различных режимов работы КП.

Анализ таких итоговых показателей, как производительность отделения монолита от массива (рис. 7, а) и эксплуатационные затраты на отделение (рис. 7, б) в зависимости от высоты уступа для различных режимов работы КП не позволяет выделить преимущества одного режима работы КП от другого, так как повышение производительности отделения монолита сопровождается повышением эксплуатационных затрат на его отделение при работе в режиме постоянной мощности резания и, наоборот, когда снижению эксплуатационных затрат соответствует понижение производительности, если КП работает в режиме постоянной скорости подачи.

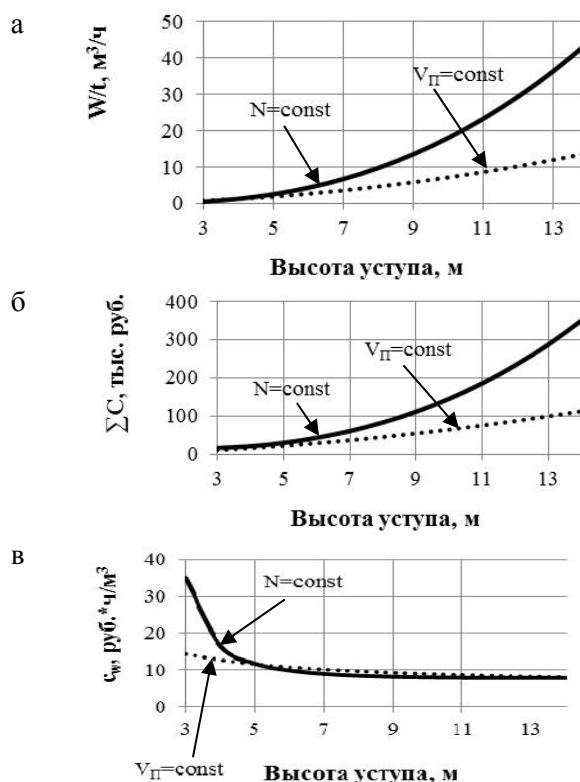


Рис. 7. Зависимость от высоты уступа (при различных режимах работы КП):

- а — производительности отделения монолита от массива с помощью КП (W/t , $\text{м}^3/\text{ч}$);
- б — эксплуатационных затрат на отделение монолита от массива (ΣC , тыс. руб.);
- в — комплексного технико-экономического показателя (C_w , $\text{руб.}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$)

В этом случае корректная оценка зависимости режима работы КП от высоты уступа может быть дана на основе комплексного технико-экономического показателя:

$$c_w = \frac{\sum C}{(W/t)}, \quad (22)$$

где $\sum C$ – эксплуатационные затраты на отделение монолита от массива, тыс. руб.; W/t – производительность отделения монолита от массива, м³/ч.

Тогда выбор режима работы КП в зависимости от высоты уступа осуществляется по минимальной величине предложенного комплексного показателя (рис. 7, в).

Как видно из рис. 7, в, при отделении монолита с высотой добычного уступа менее 4,5 м предпочтение следует отдавать режиму с постоянной скоростью подачи КП на забой. При высоте уступа более 4,5 м, когда показатель c_w изменяется незначительно от режима работы КП, целесообразен режим работы с постоянной мощностью резания, обеспечивающий более высокую производительность отделения монолита [5–8].

Выводы

1. Получены зависимости отношения производительностей резания при различных режимах работы КП от высоты уступа. При этом, начиная с высоты уступа 2–4 м, производительность резания в режиме $N=const$ по отношению к режиму $V_{II}=const$ возрастает по степенной зависимости в соответствии с формой плоскости отделения.

2. Предложены зависимости показателя удельной работы резания (A , МДж/м³) от высоты уступа при различных схемах управления КП и величине коэффициента k_ϕ . Средняя удельная работа резания (в режиме $N=const$) по отношению к удельной работе резания, соответствующей $\sigma_n^{\min} = \sigma_n^{\text{оп}}$ (в режиме $V_{II}=const$), возрастает в соответствии с формой плоскости отделения.

3. Установлены зависимости показателя $R \cdot \gamma_a$ (карат/м³) от высоты уступа при различных схемах управления КП и величине коэффициента k_ϕ . Среднее значение удельного расхода алмазного инструмента (в режиме $N=const$) по отношению к минимальному (в режиме $V_{II}=const$) возрастает в соответствии с формой плоскости отделения.

4. Время, затраченное на резание плоскостей, для условий Юго-Восточного участка Нижне-

Санарского месторождения гранодиоритов в случае работы КП в режиме $N=const$ (22,7 ч) в 1,5 раза меньше, чем в режиме $V_{II}=const$ (34,4 ч). При этом доля времени, затраченного на выполнение пропилов КП, в процессе подготовки к выемке камня занимает 51,5 и 61,5% для режимов $N=const$ и $V_{II}=const$ соответственно.

5. Удельные эксплуатационные затраты на резание плоскостей в режиме $N=const$ по отношению к режиму $V_{II}=const$ возрастают в соответствии с формой плоскости отделения. Отношение значений удельных эксплуатационных затрат $C_{s(N)}/C_{s(V)}$ при высоте уступа $H_y^{\text{оп}}=5,6$ м составляет 1,0–1,8 в зависимости от величины коэффициента k_ϕ .

6. Производительность отделения монолита от массива с помощью КП, работающей в режиме постоянной мощности резания, при высоте уступа 5–13 м повышается в 1,2–3 раза по отношению к режиму постоянной скорости подачи КП на забой. Одновременно повышаются во столько же раз и эксплуатационные затраты на отделение монолита, что не дает основания по данным показателям выявить преимущества одного режима от другого. Поэтому за критерий оценки принимается комплексный технико-экономический показатель (c_w), характеризующийся затратами, отнесенными к интенсивности отделения объемов камня от массива. Выбор рационального режима работы КП от высоты уступа достигается путем минимизации величины этого комплексного показателя.

7. Для отделения монолитов камня от горного массива при высоте добычного уступа менее 4,5 м следует выбирать режим резания с постоянной скоростью подачи КП на забой. При высоте уступа более 4,5 м, когда показатель c_w изменяется незначительно в зависимости от режима работы КП, целесообразен режим работы с постоянной мощностью резания, обеспечивающий более высокую производительность отделения монолита.

Список литературы

1. Першин Г.Д., Уляков М.С. Обоснование способов подготовки к выемке блочного природного камня высокой прочности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. №4 (32). С. 14–19.
2. Першин Г.Д., Караулов Н.Г., Уляков М.С. The research of high-strength dimension stone mining technological schemes in Russia and abroad // Сборник научных трудов SWorld. Вып. 2. Т. 11. Одесса: КУПРИЕНКО, 2013. С. 64–73.
3. Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г., Уляков М.С. Влияние режима

- управления работой канатной пилы на ее производительность // Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. С. 54–63.
4. Акопян Р.В., Лусинян К.Г. Исследование влияния режимов резания на износ алмазных элементов алмазно-канатного режущего инструмента // Изучение природных каменных материалов и силикатного сырья, разработка эффективной техники и технологии производства: сб. науч. тр. Ереван: НИИКС, 1983. С. 40–49.
 5. Features of diamond-wire saws application for rock overburden removal at marble quarry construction / Першин Г.Д., Караулов Н.Г., Уляков М.С., Шаров В.Н. // Сборник научных трудов SWorld. Вып. 3. Т. 14. Одесса: КУПРИЕНКО, 2013. С. 39–42.
 6. Першин Г.Д., Уляков М.С. Анализ влияния режимов работы канатных пил на себестоимость отделения монолитов камня от породного массива // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 2. С. 125–135.
 7. Бычков Г.В., Кокунин Р.В. Оптимальные способы вскрытия рабочих горизонтов на перспективных и эксплуатирующихся месторождениях природного камня // Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2007. С. 83–92.
 8. Бархоткин В.В., Извеков Ю.А., Миникаев С.Р. Обзор аварий на крановом оборудовании металлургических производств // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 10–1. С. 9–11.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF CABLE SAW OPERATION MODES ON CUTTING OF NATURAL STONE MONOLITHS FROM A MASSIF

Pershin Gennadiy Daltonovitch – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia.

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

Abstract. The article gives dependences of main indicators of the cutting process (performance, consumption of power and diamond tools) on the cable saw operation modes at different bench heights. We developed a technique for selecting a reasonable cable saw control mode taking into account the established dependencies on cutting performance and operational costs for cutting monoliths from the massif depending on a bench height. To select such reasonable cable saw control mode, we introduced a comprehensive technical and economic indicator (c_w) characterized by costs charged to the intensity of cutting stones from the massif.

Keywords: cable saw, performance, tool consumption, specific work of cutting, cost.

References

1. Pershin G.D., Ulyakov M.S. Substantiation of the ways to prepare block strong natural stones for excavation. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2010, no. 4 (32), pp. 14–19.
2. Pershin G.D., Karaulov N.G., Ulyakov M.S. The research of high-strength dimension stone mining technological schemes in Russia and abroad. Collection of scientific papers SWorld. Iss. 2. Vol. 11. Odessa: Kuprienko, 2013, pp. 64–73.
3. Pershin G.D., Pshenichnaya E.G., Ulyakov M.S. Influence of a cable saw control mode on its performance. *Dобыча, обработка и применение природного камня* [Natural stone mining, processing and application: collection of scientific papers]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, pp. 54–63.
4. Akopyan R.V., Lusinyan K.G. Study of the influence of cutting modes on wear of diamond elements of diamond rope cutting tools. *Izucheniye prirodnnykh kamennykh materialov i silikatnogo syrya, razrabotka effektivnoy tekhniki i tekhnologii proizvodstva* [The study of natural stone materials and silicate raw materials, development of efficient equipment and production technology: collection of scientific papers]. Yerevan: RISS, 1983, pp. 40–49.
5. Pershin G.D., Karaulov N.G., Ulyakov M.S., Sharov V.N. Features of diamond-wire saws application for rock overburden removal at marble quarry construction. Collection of scientific works SWorld. Iss. 3. Vol. 14. Odessa: Kuprienko, 2013, pp. 39–42.
6. Pershin G.D., Ulyakov M.S. Analysis of the influence of cable saw operation modes on cost of cutting stone monoliths from a rock massif. *Physics and technology problems of resource development*, 2014, no. 2, pp. 125–135.
7. Bychkov G.V., Kokunin R.V. Optimum ways of opening working levels at prospective and operating natural stone deposits. *Dобыча, обработка и применение природного камня* [Natural stone mining, processing and application: collection of scientific papers]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2007, pp. 83–92.
8. Barkhotkin V.V., Izvekov Yu.A., Minikayev S.R. The review of accidents on crane equipment of metallurgical facilities. *International journal of applied and basic research*, 2013, no. 10–1, pp. 9–11.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 539.319

РАВНОНАПРЯЖЕННЫЕ ЛИСТОВЫЕ РЕССОРЫ

Няшин Ю.И., Осипенко М.А., Гитман М.Б.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия.

Аннотация. Приведен ряд результатов по отысканию параметров равнонапряженных листовых рессор. Рассмотрен нелинейный изгиб однолистовой рессоры переменного профиля и установлено, что оптимальный профиль при сильном изгибе является эллиптическим. Изучен линейный изгиб двухлистовой рессоры с листами переменного профиля. Доказано, что для листов различной длины равнонапряженная рессора не существует при сохранении знака напряжения вдоль листов; для листов одинаковой длины такая рессора существует. Если же знак может не сохраняться, но модуль напряжения сохраняется, то равнонапряженная рессора существует при достаточно большой длине короткого листа и имеет внутренний шарнир. Найдены параметры частично равнонапряженной двухлистовой рессоры с листами постоянного профиля и установлена связь этих параметров с решением задачи минимизации максимальных напряжений в рессоре.

Ключевые слова: листовая рессора, линейный и нелинейный изгиб, равнонапряженная рессора, внутренний шарнир, минимизация напряжений.

Введение

Листовые рессоры широко используются в подвесках автомобилей (рис. 1) [1, 2]. Известно также использование листовых рессор в качестве упругих элементов протезов стопы (рис. 2) [3–5]. Поэтому задача о проектировании надежных и долговечных листовых рессор является актуальной. Важнейшей характеристикой рессоры, определяющей ее прочность, является величина максимального напряжения. Оптимальными считаются *равнонапряженные* рессоры, или максимально приближенные к равнонапряженным [1, 4, 6, 7]. В настоящее время задача такой оптимизации рессоры не является в достаточной мере изученной, в частности, потому, что требует решения также недостаточно изученной задачи об одностороннем контакте листов рессоры [8, 9]. В данной работе рассмотрены такие задачи построения равнонапряженной рессоры, которые требуют лишь минимального обращения к решению соответствующей контактной задачи.

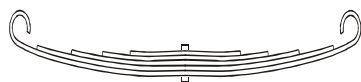


Рис. 1. Упругий элемент подвески автомобиля

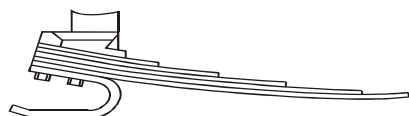


Рис. 2. Упругий элемент протеза стопы

Математическая модель листовой рессоры

Простейшая модель листовой рессоры [6, 8] представляет собой пачку N консольно закрепленных балок (листов) Бернулли – Эйлера [10] одинаковой ширины w , но с различными длинами $l_1, \dots, l_N$ и различными переменными толщинами $h_1(x), \dots, h_N(x)$ (x – координата, отсчитываемая вдоль балки) (рис. 3).

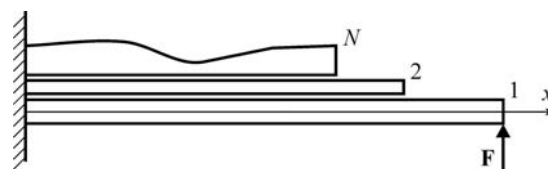


Рис. 3. Модель листовой рессоры

В естественном состоянии (без нагрузки) листы являются плоскими и плотно прилегают друг к другу; трение между листами отсутствует. К краю самого длинного листа, перпендикулярно листу, приложена сосредоточенная следящая сила F . Форма изогнутого листа (в равновесии) задается функцией $\varphi(x)$, где φ – угол между профилями изогнутого и неизогнутого листов (рис. 4). Если лист изогнут, то в точке с координатой x со стороны правой (по отношению к данной точке) части листа на левую действует сосредоточенный момент

$$M(x) = Ewh^3(x)\varphi'(x)/12, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга. При этом напряжение (единственная существенная компонента σ_{xx}) на нижней поверхности листа

$$\sigma(x) = Eh(x)\varphi'(x)/2. \quad (2)$$

Оптимальными считаются равнонапряженные рессоры, то есть удовлетворяющие условию

$$|\sigma_n(x)| \equiv \sigma = \text{const}, \quad 1 \leq n \leq N. \quad (3)$$

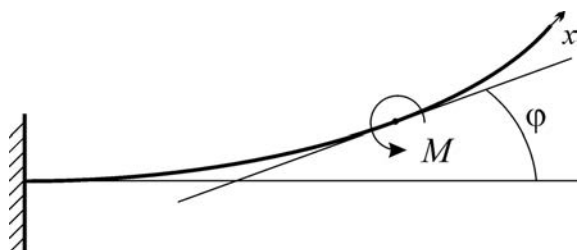


Рис. 4. Схема изгиба одного листа

При невозможности построения равнонапряженной рессоры требуется построить частично равнонапряженную рессору (см. ниже). Равнонапряженность (полная или частичная) достигается подбором функций $h_n(x)$. Рассмотрим вопрос об отыскании этих функций в некоторых частных случаях.

Оптимальный профиль однолистовой рессоры при нелинейном изгибе

Пусть рессора однолистовая. Уравнение равновесия листа следует из (1) с учетом сделанного предположения о нагрузке (сосредоточенная сила):

$$Ewh^3(x)\varphi'(x)/12 = F \int_x^l \cos(\varphi(l) - \varphi(s)) ds. \quad (4)$$

Из (2)–(4) и условия защемления листа (при $x = 0$) находим

$$\begin{cases} \varphi''/\varphi'^3 = \lambda \cos(\varphi(l) - \varphi), \\ \varphi(0) = 0, \quad \varphi'(l) = +\infty, \end{cases} \quad (5)$$

где $\lambda = 3E^2F/(4\sigma^3w)$. Нелинейность задачи (5) означает, что рассматривается сильный изгиб. Решение (5) существует (и единственно) при $l/\lambda \leq 2$ и имеет вид

$$\varphi(x) = \arccos(1 - l/\lambda) - \arccos(1 - (l - x)/\lambda). \quad (6)$$

Тогда из (2), (3) получаем

$$h(x) = (2\sigma\lambda/E) \sqrt{1 - (1 - (l - x)/\lambda)^2}, \quad (7)$$

то есть однолистовая равнонапряженная рессора имеет эллиптический профиль.

Практически при нахождении профиля задается не σ , а прогиб рессоры

$$\Delta = \int_0^l \sin \varphi(x) dx.$$

Тогда из (6) находим, что $l/\lambda = 1 - \cos \alpha$, где $0 < \alpha \leq \pi$ – корень уравнения

$$(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha)/(1 - \cos \alpha) = 2\Delta/l. \quad (8)$$

Легко установить, что при $\Delta/l \leq \pi/4$ это уравнение имеет единственное решение. Если $\Delta/l \ll 1$ (слабый изгиб; эквивалентное условие: $|\varphi(x)| \ll 1$), то из (7), (8) получаем известный результат [1]: $h(x) = 2l(F/Ew\Delta)^{1/3} \sqrt{1 - x/l}$, то есть однолистовая равнонапряженная рессора при слабом изгибе имеет параболический профиль.

Оптимальные профили двухлистовой рессоры при линейном изгибе

Теперь рассмотрим двухлистовую рессору при слабом изгибе. Предположим, что: а) листы рессоры контактируют (кроме точки защемления) только в точке, расположенной на краю более короткого листа; б) $\sigma_n(x) \equiv \sigma$ (а не модуль, что требуется в (3)). Тогда уравнения равновесия листов имеют вид

$$Ewh_1^3(x)\varphi_1'(x)/12 = \begin{cases} -P(l_2 - x) + F(l_1 - x) & (0 \leq x \leq l_2), \\ F(l_1 - x) & (l_2 \leq x \leq l_1), \end{cases} \quad (9)$$

$$Ewh_2^3(x)\varphi_2'(x)/12 = P(l_2 - x), \quad (10)$$

$$\varphi_1(0) = \varphi_2(0) = 0, \quad (11)$$

где P – сила взаимодействия листов, которая находится из условия контакта листов в точке $x = l_2$:

$$y_1(l_2) = y_2(l_2); \quad (12)$$

$$y_n(x) = \int_0^x \varphi_n(s) ds. \quad (13)$$

Из (9)–(13), (2), (3) (с учетом предположения

(б)) можно получить уравнение для P в виде

$$\xi + 2\beta = (\xi + \beta)^2 / \sqrt{1 - \xi^2},$$

где $\beta = \sqrt{1 - l_2/l_1}$, $\xi = \sqrt{1 - Pl_2/F l_1}$. Легко установить, что при $0 \leq \beta < 1$ это уравнение имеет единственное решение ξ . Однако, находя из (9)–(11), (2), (3) $\varphi_1(x)$, $\varphi_2(x)$ и затем из (13) $y_1(x)$, $y_2(x)$, можно показать, что при $l_2 < l_1$ $\lim_{x \rightarrow 0} y_2(x)/y_1(x) < 1$ (верхний лист «проникает» под нижний), а при $l_2 = l_1$ $y_1(x) \equiv y_2(x)$. Таким образом, при $l_2 = l_1 = l$ получаем одинаковые параболические профили листов $h_1(x) = h_2(x) = 2l(F/2Ew\Delta)^{1/3} \sqrt{1 - x/l}$, а при $l_2 < l_1$ равнонапряженная рессора, для которой выполняются принятые выше предположения (а) и (б), не существует.

Докажем, что при сохранении предположения (б) при $l_2 < l_1$ равнонапряженная рессора не существует, даже если отказаться от предположения (а) и допустить, что листы могут контактировать по некоторой области $0 < l_* \leq x \leq l_2 < l_1$. Учитывая, что при $0 \leq x \leq l_*$

$$Ewh_1^3(x)\varphi_1'(x)/12 = F(l_1 - x) - \int_{l_*}^{l_2} p(s)(s - x)ds,$$

$$Ewh_2^3(x)\varphi_2'(x)/12 = \int_{l_*}^{l_2} p(s)(s - x)ds,$$

$$\varphi_1(0) = \varphi_2(0) = 0,$$

где $p(x) \geq 0$ – плотность сил взаимодействия листов, получим с учетом (2), (3), (13) из условий $\varphi_1(l_*) = \varphi_2(l_*)$ и $y_1(l_*) = y_2(l_*)$ соответственно

$$\begin{aligned} A_1 + A_2 &= A_3 + A_4, \\ \frac{(A_1 + 2A_2)}{(A_1 + A_2)^2} &= \frac{(A_3 + 2A_4)}{(A_3 + A_4)^2}, \end{aligned} \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= \sqrt{F(l_1 - l_*) - \int_{l_*}^{l_2} p(s)(s - l_*)ds}, \\ A_2 &= \sqrt{F l_1 - \int_{l_*}^{l_2} p(s)sds}, \end{aligned} \quad (15)$$

$$A_3 = \sqrt{\int_{l_*}^{l_2} p(s)(s - l_*)ds},$$

$$A_4 = \sqrt{\int_{l_*}^{l_2} p(s)sds}. \quad (16)$$

Из (14)–(16) следует, что $\int_{l_*}^{l_2} p(s)ds = F/2$ и $\int_{l_*}^{l_2} p(s)sds/l_1 = F/2$, но эти два равенства противоречивы, так как $p(x) \geq 0$ и $l_2 < l_1$. Поэтому высказанное выше утверждение доказано.

Откажемся тогда от предположения (б), сохранив (а). Из (9), (2) следует, что если

$$Pl_2 > Fl_1, \quad (17)$$

то $\sigma_1(x)$ меняет знак в точке $x_* = \frac{(Pl_2 - Fl_1)}{(P - F)}$. Тогда из (9)–(13), (2), (3) получаем уравнение для P в виде

$$(1 + \eta)^2 = (2 - \sqrt{\eta}(\eta + 3))\sqrt{\eta + \gamma/(\gamma - 1)},$$

где $\gamma = l_1/l_2$, $\eta = (P/F - \gamma)/(\gamma - 1)$. Легко установить, что при $\gamma > 1$ это уравнение имеет единственное решение η , которому соответствует P , удовлетворяющее условию (17). Тогда профиль нижнего листа

$$h_1(x) = \begin{cases} \sqrt{6(P - F)(x_* - x)/\sigma w} & (0 \leq x \leq x_*), \\ \sqrt{6(P - F)(x - x_*)/\sigma w} & (x_* \leq x \leq l_2), \\ \sqrt{6F(l_1 - x)/\sigma w} & (l_2 \leq x \leq l_1). \end{cases}$$

Заметим, что $h_1(x_*) = 0$; это означает, что в точке $x = x_*$ нижний лист имеет *внутренний шарнир*. Профиль верхнего листа параболический:

$$h_2(x) = \sqrt{6P(l_2 - x)/\sigma w}.$$

Для проверки непротиворечивости предположения (а) и требования равнонапряженности рессоры нужно исследовать знак разности $y_2(x) - y_1(x)$. Можно установить, что $y_2(x) \geq y_1(x)$ при $\zeta < l_2/l_1 < 1$, где $\zeta = 2(4 - \sqrt{2})/7$, а при $l_2/l_1 < \zeta$ существуют $0 < x < l_2$, для которых $y_2(x) < y_1(x)$. Тем самым, равнонапряженная рессора с найденными

выше профилями существует только при $l_2/l_1 > \zeta$. Вопрос о существовании равнонапряженных двухлистовых рессор при слабом изгибе для $l_2/l_1 < \zeta$ остается открытым и требует дальнейшего исследования.

Частично равнонапряженная двухлистовая рессора с листами постоянной толщины

Рассмотрим двухлистовую рессору с листами постоянной толщины. Обеспечить полную равнонапряженность такой рессоры, очевидно, невозможно. Потребуем, чтобы рессора была частично равнонапряженной, а именно

$$|\sigma_1(x)| \equiv \sigma = \text{const}, 0 \leq x \leq l_2; \quad |\sigma_2(0)| = \sigma. \quad (18)$$

Предполагая, что листы контактируют (кроме точки защемления) только в точке, расположенной на краю более короткого листа, из (9–13), (2), (18) нетрудно найти, что $l_2/l_1 = 4/13$, $h_2/h_1 = 2/3$. Легко также установить, что $y_2(x) \geq y_1(x)$ при $0 \leq x \leq l_2$, следовательно, принятое предположение о характере контакта подтверждается.

В данном случае можно также установить, что параметры такой частично равнонапряженной рессоры являются решением другой задачи оптимизации, которая в определенном смысле более естественна. Так как изгиб линейный, то прогиб $\Delta = AF$. Максимальное напряжение в рессоре

$$\sigma_{\max} = \max \left(\max_{0 \leq x \leq l_1} |\sigma_1(x)|, \max_{0 \leq x \leq l_2} |\sigma_2(x)| \right).$$

Так как изгиб линейный, то $\sigma_{\max} = BF$. При заданных E , w , l_1 , величины A и B есть функции l_2 , h_1 , h_2 . Более естественная задача оптимизации рессоры состоит в отыскании l_2 , h_1 , h_2 таких, что $B = \min$ при условии, что $A = A_0$ задано. Вводя безразмерные параметры $\lambda = (3 - l_2/l_1)/2$, $\mu = 1/(1 + h_1^3/h_2^3)$, принадлежащие области D ($1 \leq \lambda < 3/2$, $0 < \mu < 1$), нетрудно из (9)–(13), (2) найти, что

$$A = \left(4l_1^3 / (Ewh_1^3) \right) \alpha(\lambda, \mu),$$

$$B = \left(6l_1 / (wh_1^2) \right) \beta(\lambda, \mu),$$

где

$$\alpha(\lambda, \mu) = 1 - \lambda^2 (3 - 2\lambda)\mu,$$

$$\beta(\lambda, \mu) = \max \left(|1 - \lambda\mu|, 2(\lambda - 1), \lambda\mu^{1/3}(1 - \mu)^{2/3} \right).$$

Тогда упомянутая задача оптимизации сводится к отысканию точки безусловного минимума функции $\beta(\lambda, \mu)/\alpha(\lambda, \mu)^{2/3}$ в области D . Принципиально несложное (но несколько громоздкое) решение этой задачи минимизации приводит к выписанным выше значениям l_2/l_1 и h_2/h_1 . Этот результат является нетривиальным и позволяет надеяться, что найденные выше параметры равнонапряженных рессор также являются решениями аналогичных задач минимизации. Однако строгого доказательства этого утверждения в настоящее время не имеется.

Заключение

В работе найден ряд новых параметров оптимальных, в смысле равнонапряженности, листовых рессор. Показано, что такие рессоры не всегда существуют даже при возможности подбора переменного профиля, а существующие могут иметь особенность – внутренний шарнир. Установлено совпадение параметров частично равнонапряженной двухлистовой рессоры с листами постоянных профилей с параметрами такой же рессоры с минимизированным максимальным напряжением. Полученные результаты имеют практическое значение для проектирования надежных и долговечных рессор, а также вносят вклад в общую теорию расчета рессор.

Список литературы

1. Пархиловский И.Г. Автомобильные листовые рессоры. М.: Машиностроение, 1978. 227 с.
2. Пономарев С.Д. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. Т. 1. М.: Машгиз, 1956. 884 с.
3. Mathematical modelling of the foot prosthesis elastic element under bending / Osipenko M.A., Nyashin Y.I., Rudakov R.N., Ostanin A.V., Kuleshova E.N., Zhuravleva T.N. // Russian Journal of Biomechanics. 2001. Vol. 5. No. 2. P. 18-29.
4. Оптимизация двухлистового упругого элемента протеза стопы с использованием линейной и нелинейной теорий изгиба / Брынских С.И., Осипенко М.А., Няшин Ю.И. // Российский журнал биомеханики. 2003. Т. 7. № 2. С. 9-19.
5. Significance of nonsagittal power terms in analysis of a dynamic elastic response prosthetic foot / Geil M.D., Parnianpour M., Berme N. // Journal of Biomechanical Engineering. October 1999. Vol. 121. P. 521-524.
6. К теории изгиба листовой рессоры / Няшин Ю.И., Осипенко М.А., Рудаков Р.Н. // Известия РАН. Механика твердого тела. 2002. № 6. С. 134-143.
7. О свойствах коэффициента использования материала листовой рессоры / Осипенко М.А., Таланцев Н.Ф. // Изв. вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2009. № 2(10). С. 134-144.
8. A contact problem in the theory of leaf spring bending / Osipenko M.A., Nyashin Y.I., Gritman M.B. // Journal of Biomechanical Engineering. 2004. Vol. 126. P. 101-106.

- penko M.A., Nyashin Yu.I., Rudakov R.N. // International Journal of Solids and Structures. 2003. Vol. 40. P. 3129-3136.
9. Об одном подходе к решению некоторых одномерных контактных задач / Осипенко М.А., Нышин Ю.И. // Известия Саратовского университета. Новая серия. 2011. Т. 11, сер. Математика. Механика. Информатика, вып. 1. С. 77-84.

10. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. 711 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

EQUAL-STRESS LEAF SPRINGS

Nyashin Yury Ivanovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Theoretical Mechanics and Biomechanics Department, Perm National Research Polytechnic University, Russia. Phone: +7(342) 239 17 02. E-mail: nyashin@inbox.ru.

Osipenko Mikhail Anatolyevich – Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, Russia. Phone: +7 (342) 239 17 02. E-mail: oma@theormech.pstu.ac.ru.

Gitman Mikhail Borisovich – D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Perm National Research Polytechnic University, Russia. Phone: +7 (342) 239 12 97. E-mail: tpu@matmod.pstu.ac.ru.

Abstract. A series of results concerning the finding of the parameters of the equal-stress leaf springs is presented. The nonlinear bending of the single-leaf spring of the variable profile is considered. It is established that the optimum profile for a strong bending is elliptic. The linear bending of a two-leaf spring with leaves of a variable profile is studied. It is proved that the equal-stress spring does not exist for different lengths of leaves, if the stress sign is invariable along leaves. Such spring exists only for equal lengths of leaves. If the sign varies but the absolute value of stress is invariable, then the equal-stress spring exists when a shorter leaf is sufficiently long. Such spring contains the internal joint. The parameters of a partially equal-stress two-leaf spring with constant profiles of the leaves are found. The connection between these parameters and a solution of the problem of maximum stress minimization is established.

Keywords: leaf spring, linear and nonlinear bending, equal-stress spring, internal joint, stress minimization.

References

1. Parkhilovsky I.G. *Avtomobilnye listovye resory* [Automotive leaf springs]. Moscow: Mechanical Engineering, 1978. 227 p.
2. Ponomarev S.D. et al. *Raschyoty na prochnost v mashinostroenii* [Stress calculation in mechanical engineering]. Vol. 1. Moscow: Mechanical Engineering Publ., 1956. 884 p.
3. Osipenko M.A., Nyashin Yu.I., Rudakov R.N., Ostanin A.V., Kuleshova E.N., Zhuravleva T.N. Mathematical modelling of the foot prosthesis elastic element under bending. *Russian Journal of Biomechanics*. 2001, vol. 5, no. 2, pp. 18–29.
4. Brynsikh S.I., Osipenko M.A., Nyashin Yu.I. Optimizatsiya dvukhlistovogo uprugogo elementa proteza stopy s ispolzovaniem lineinoi i nelineinoi teorii izgiba [The optimization of the two-leaf elastic element of the foot prosthesis under linear and non-linear bending theories]. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki* [Russian Journal of Biomechanics]. 2003, vol. 7, no. 2, pp. 9–19.
5. Geil M.D., Parnianpour M., Berme N. Significance of nonsagittal power terms in analysis of a dynamic elastic response prosthetic foot. *Journal of Biomechanical Engineering*. October 1999, vol. 121, pp. 521–524.
6. Nyashin Yu.I., Osipenko M.A., Rudakov R.N. K teorii izgiba listovoy resory [On the theory of leaf spring bending]. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of Solids]. 2002, no. 6, pp. 134–143.
7. Osipenko M.A., Talantsev N.F. O svoistvakh koeffitsienta ispolzovaniya materiala listovoy resory [On the properties of the material utilization coefficient for a leaf spring]. *Izvestiya VUZov. Povolzsky region. Tekhnicheskie nauki* [News of Higher Educational Institutions. Volga Region. Technical Sciences]. 2009, no. 2(10), p. 134–144.
8. Osipenko M.A., Nyashin Yu.I., Rudakov R.N. A contact problem in the theory of leaf spring bending. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, vol. 40, pp. 3129–3136.
9. Osipenko M.A., Nyashin Yu.I. Ob odnom podkhode k resheniyu nekotorykh odnomernykh kontaktnykh zadach [A certain approach to solving some one-dimensional contact problems]. *Izvestiya Saratovskogo Universiteta. Novaya seriya. Seriya Matematika. Mekhanika. Informatika*. [News of Saratov University. New Series. Series in Mathematics, Mechanics, Computer Science]. 2011, vol. 11, no. 1, pp. 77–84.
10. Rabotnov Yu.N. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Mechanics of Deformable Solids]. Moscow: Science, 1988, 711 p.

УДК 621.778.011:001.891.57

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТИ СТРУКТУРЫ

Барышников М.П.¹, Чукин М.В.¹, Бойко А.Б.¹, Дыя Х.², Назайбеков А.Б.³

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

² Ченстоховский технологический университет, Польша

³ Рудненский индустриальный институт, Казахстан

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния неоднородности структурных составляющих на напряженно-деформированное состояние в процессах обработки давлением металлов и сплавов.

Выполнен обзор методов моделирования с выявлением их достоинств и недостатков. Представлен анализ микроструктуры катанки и определен тип неметаллических включений для конечно-элементного моделирования в программном комплексе. Методом конечных элементов выполнено моделирование процессов осадки биметаллической сталемедной катанки и волочения высокопрочной арматуры из стали марки 80Р.

Ключевые слова: неоднородность структуры, микроструктура, неметаллические включения, метод конечных элементов.

Введение

В условиях постоянной интенсификации производства очень важным является качество заготовки, полученной на каждом предшествующем этапе. Несоответствие механических свойств заготовки приводит к дополнительным экономическим издержкам, обусловленным простоем оборудования, отбраковкой заготовки с высокой добавленной стоимостью, а также повышению вероятности возникновения несчастных случаев с участием технологического персонала. Снижение вероятности получения несоответствующей продукции возможно использованием комплексного подхода, сочетающего исследование факторов, влияющих на снижение механических свойств, и анализ возможности их устранения. Развитие программных средств и совершенствование вычислительной техники предоставляет возможность проведения испытаний средствами компьютерного моделирования. При этом экспериментальная работа с промышленными и лабораторными установками необходима для подтверждения соответствия математической модели эмпирическим данным.

Исследование механических характеристик среды

Исследование механических характеристик среды в большинстве случаев сводится к оценке прочности согласно известному напряженному состоянию [1–5]. Напряженное состояние в самом простом случае можно разделить на одноосное (линейное) и сложное. Сложное напряженное состояние в свою очередь принято разделять на плоское и объемное. При решении модели линейного напряженного состояния основной задачей является определение максимальных напряжений и деформаций в наиболее опасном сечении. Задача существенно усложняется при сложном напряженном состоянии. В этом случае определить максимальное главное напряжение для опасного сечения оказывается недостаточным, поскольку более важным оказывается не критическое значение какого-либо напряжения или значения деформации, а соотношения между ними. С целью определения наиболее опасного состояния в зависимости от объемного напряженно-деформированного состояния необходимо принять некоторый критерий, согласно которому можно определить преимущественное влияние какого-либо компонента НДС.

Введение критерия прочности позволяет перейти от сложного напряженного состояния к равноопасному, эквивалентному ему с точки зрения прочности материала. Для этой цели используют понятие эквивалентного напряжения – напряжение, под действием которого материал в условиях простого растяжения-сжатия оказывается в равноопасном состоянии с рассматриваемым напряженным состоянием.

Объектом исследования данной работы является процесс формоизменения заготовки под действием внешних сил. При внесении в объект исследования дискретности структуры, связанной с наличием в заготовке нескольких составляющих, возможны два подхода к описанию среды и последующему решению поставленной задачи. Первый подход предполагает описание всего объема заготовки как сплошной среды с равномерными свойствами. Чтобы учесть изменение механических свойств заготовки в результате влияния неравномерности структуры, при расчете НДС, в уравнение необходимо вносить поправочные коэффициенты. Для нахождения поправочных коэффициентов возможно применение коэффициентов, вычисленных теоретически, либо полученных эмпирическим путем. Данный подход позволяет упростить решение задачи, в том числе при помощи математического моделирования, однако указанные допущения не позволяют оценить распределение напряжений и деформаций в процессе формоизменения с достаточной точностью. Указанный недостаток можно избежать применением второго подхода к описанию среды, заключающийся в представлении объема заготовки как дискретной среды. В рамках данного подхода заготовка рассматривается как композиционный материал. Поскольку целью данной работы является наиболее полное и точное описание НДС заготовки, для решения поставленной задачи применялась методика описания среды как композиционного материала. Рассмотрим методы моделирования с выявлением их достоинств и недостатков.

Методы моделирования

Аналитические методы, основанные на теории вероятностей, случайных процессов, методах оптимизации и др., заключаются в выводе математических символов и зависимостей последовательным применением математических правил. Достоинство – в отсутствии необходимости при-

менения вычислительных машин и возможность решения в явной аналитической форме. Недостаток – в невозможности получения необходимых математических отношений для тел сложной геометрии и недостаточной точности результатов решения вследствие большого числа допущений.

Численные методы, основанные на замене математических операций и отношений соответствующими операциями над числами. Достоинство – сравнительно с аналитическими методами более широкий круг решаемых задач и возможность оценочного расчета тел простой формы без применения вычислительных машин. Недостаток, как и для аналитических методов, – малая точность вследствие большого числа допущений.

Метод конечных элементов основан на построении имитационной модели, объединяющей свойства отдельных элементов в единую систему. Преимущество метода, прежде всего, в его универсальности. С помощью данного метода возможно выполнить разбиение на конечные элементы тела любой формы. В этом случае ограничения будут только во времени, необходимом на вычисление, поскольку сложная форма изделия предполагает разбиение на большее число элементов, что в свою очередь увеличивает общее время расчета. Недостаток – в необходимости применения специализированных программных средств [6], зависимость результатов расчета от выбора базисных функций и отсутствие общепринятого и теоретически обоснованного метода оценки погрешности расчета. В результате чего перед применением метода с определенным набором базисных функций на сложной инженерной задаче рекомендуется сравнение результатов расчета более простой задачи с аналогичными начальными условиями методом конечных элементов с экспериментом. При этом необходимо отметить особенность метода, заключающуюся в подборе поля перемещений с учетом минимизации некоторого функционала, имеющего энергетический смысл. Поэтому точность определения упругой энергии, запасенной в конструкции при заданных нагрузках, оказывается выше, чем точность определения перемещений. В свою очередь точность определения напряжений ниже точности определения перемещений, поскольку напряжения определяются по деформациям, полученным дифференцированием перемещений. В этом случае погрешность численного дифференцирования может быть существенной. С учетом этого, хотя уменьшение характерного размера конечного элемента уменьшает ошибки дискретизации, являющиеся результатом геометрических различий физического тела и модели, чрезмерно большое число конечных элементов увеличивают погрешность, связанную с ошибками округления.

При выборе конечных элементов, на которые предполагается разбиение модели, необходимо выполнение условия непрерывности поля перемещений в конструкции. Для этого должно быть совпадение вершин соседних конечных элементов. В противном случае, базисная функция не будет непрерывной даже в случае заполнения конечными элементами всей конструкции без пустот. С физической точки зрения это будет эквивалентно наличию разрыва (трещины) в конструкции [7].

Для качественного и количественного описания среды применяются математические модели. Моделирование используется в случаях, когда прямой эксперимент с объектом трудновыполним, невыгоден с экономической точки зрения или невозможен.

Исследование напряженно-деформированного состояния с учетом неоднородности структуры

В общем случае неоднородность структуры металлических материалов можно рассматривать на трех уровнях:

Макроуровень. Неоднородность структуры, различаемая невооруженным глазом, например биметаллическая сталемедная проволока.

Мезоуровень. Структура железоуглеродистых сплавов, при увеличении в оптическом микроскопе, например неметаллические включения в металлах.

Микроуровень. Строение материала, выявляемое с помощью микроскопа, преимущественно электронного, например, рассмотрение структуры зернистого перлита как ферритная матрица, дисперсно-упрочненная включениями цементита.

В данной работе исследовано НДС при обработке давлением на макро- и мезоуровнях.

С целью оценки возможности моделирования неоднородности структуры материала на макроуровне проведено математическое моделирование процесса осадки биметаллической сталемедной катанки (рис. 1) в программных комплексах Simulia Abaqus и Deform-3D (рис. 2).

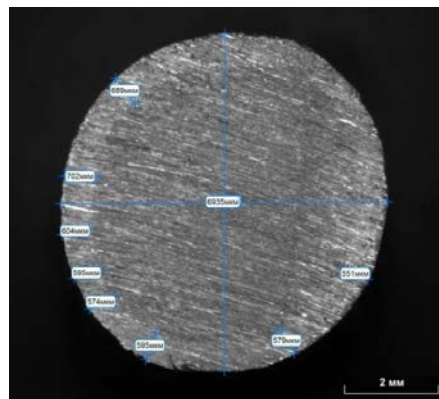
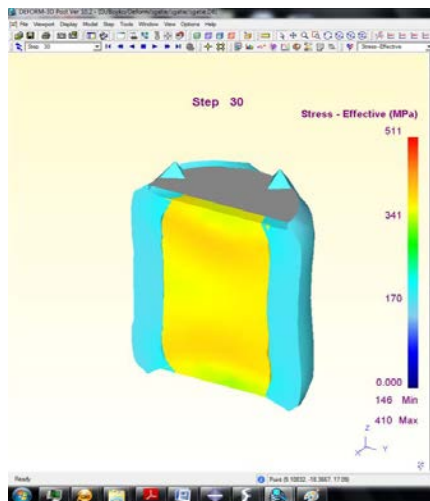


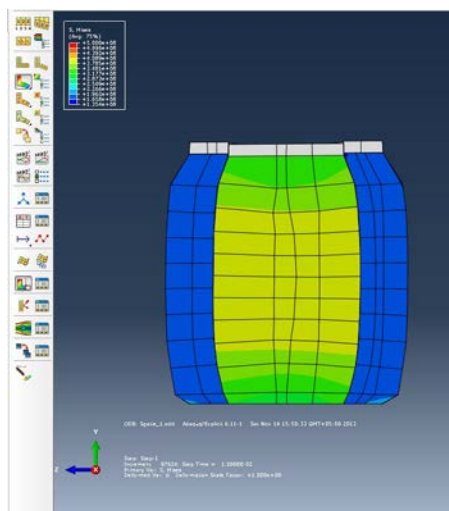
Рис. 1. Поперечное сечение сталемедной катанки

В таблице представлены механические свойства исследуемых материалов.

Показатель	Материал сердечника (сталь)	Материал оболочки (медь)
Предел текучести, МПа	250	120
Предел прочности, МПа	410	250
Модуль упругости, ГПа	210	100
Коэффициент Пуассона	0,28	0,35



а



б

Рис. 2. Формоизменение и НДС заготовки в процессе равномерного сжатия на 30%. Моделирование выполнено в Deform-3D (а) и Abaqus (б)

Как видно из результатов моделирования, напряженное состояние заготовки в двух программных комплексах различается незначительно. Максимальные напряжения, рассчитанные Deform-3D при осадке на 30%, в стальном сердечнике – 380 МПа, в медной оболочке – 180 МПа. Максимальные напряжения, рассчитанные Sim-

ulia Abaqus, 408 и 196 МПа соответственно. При моделировании в Simulia Abaqus заготовка приобретает бочкообразную форму при относительном обжатии 30%, модель, выполненная в Deform-3D, также начинает приобретать бочкообразную форму, но менее выраженную.

В результате сравнения программных комплексов, их можно использовать при моделировании процессов формоизменения заготовок сплошного сечения. Однако отсутствие подходящего инструментария в Deform-3D не позволяет с его помощью проводить моделирование дискретной структуры материала на мезоуровне, например, при наличии в заготовке для дальнейшего передела в процессах ОМД неметаллических включений и пор. Данная задача решается с помощью программного комплекса Simulia Abaqus.

Исследование НДС при рассмотрении структуры на мезоуровне представлено в процессе волочения заготовки с неоднородностью структуры в виде неметаллических включений.

Для проведения металлографических испытаний в продольном и поперечном направлении с целью определения распределения неметаллических включений по сечению заготовки (рис. 3) и оценки их количественного содержания с помощью программного обеспечения ThixometPro отобраны образцы катанки диаметром 15,5 мм из стали 80.

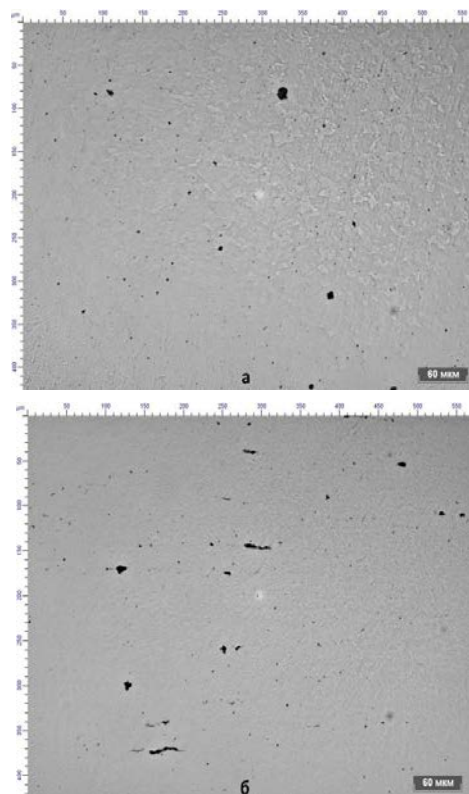


Рис. 3. Микроструктура катанки стали марки 80 в поперечном (а) и продольном (б) сечениях после горячей прокатки

В результате исследования микроструктуры значительного количества пластичных включений и разрушенных в результате деформации вытянутых в сплошные строки хрупких включений согласно ГОСТ 1778 не обнаружено. Включения преимущественно представляют собой недеформирующиеся (глобулярные) единичные включения оксидов (рис. 4), в результате чего целесообразно моделирование неметаллических включений при деформации холодным волочением как тел, обладающих упругими свойствами.

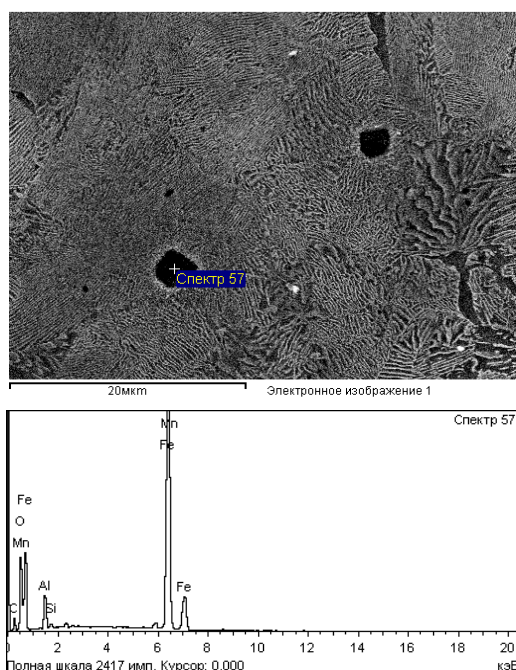


Рис. 4. Электронное изображение и анализ химического состава включения

Проведено исследование процесса волочения проволоки из стали марки 80P с диаметра 15,5 до 9,98 мм, предназначенной для армирования железобетонных шпал. Данный вид продукции является ответственным и требующим анализа НДС с целью определения факторов, оказывающих наибольшее влияние на механические свойства заготовки и готовой продукции. Неметаллические включения Al_2O_3 заданы только упругими свойствами и не подвержены пластической деформации.

Моделирование волочения проволоки выполнено по действующему маршрутам в ОАО «ММК-МЕТИЗ»:

15,5 мм – 14,78 мм – 13,48 мм – 12,38 мм – 11,46 мм – 10,68 мм – 9,98 мм.

Неметаллические включения способствуют повышению значений эквивалентных напряжений в непосредственной близости от включений до 974 МПа при средних значениях вне очага деформации 650 МПа. Исследования структуры на развитие трещин [8–12], в том числе с помощью электронного микроскопа [13–14] подтверждают, что неметаллические включения являются концентраторами напряжений и источниками зарождения трещин.

В результате моделирования волочения проволоки выявлены минимальные эквивалентные напряжения по оси заготовки, при наличии включений в данной области (рис. 5) напряжения вблизи включений увеличиваются, но запаса прочности достаточно для волочения без обрыва заготовки.

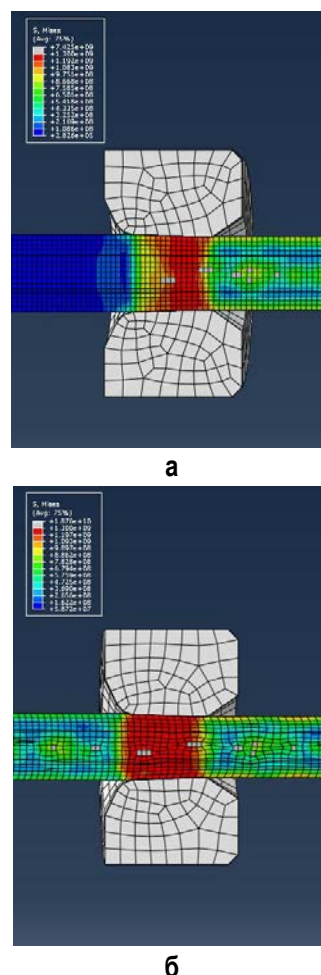


Рис. 5. Распределение НДС по сечению заготовки при волочении в первой (а) и третьей проволоке (б)

Закключение

В результате исследования определено влияние неоднородности структуры на напряженно-деформированное состояние в процессах обработки давлением. На основании обзора методов моделирования определен метод конечных элементов как наиболее подходящий для решения поставленной задачи с возможностью рассмотрения дискретности исследуемой среды.

Список литературы

1. Bichler C., Pippan R. Direct observation of the residual plastic deformation caused by a single tensile overload. Proc. 2nd Symp. on Fatigue Crack Closure, Measurement and Analysis, ASTM STP. 1999.
2. Christ H.-J., Mughrabi H. Cyclic stress-strain response and mi-

- crostructure under variable amplitude loading. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 1996. № 19. P.335.
3. Hertzberg, R.W. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*, Wiley. New York, 1996.
 4. Murakami Y. *The stress intensity factors handbook*, Pergamon Press. New York, 1987.
 5. Tada H., Paris P.C., Irwin, G.R. *The stress analysis handbook*, 3rd edition, ASME Press. New York, 2000.
 6. Барышников М.П., Чукин М.В., Бойко А.Б. Анализ программных комплексов для расчета напряженно-деформированного состояния композиционных материалов в процессах обработки давлением // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 4. С. 72–74.
 7. Чернявский А.О. Метод конечных элементов. Основы практического применения [Электронный ресурс] ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ). URL: http://pent.sopro.susu.ac.ru/LRN/0711/smm/files/fea_4c.pdf.
 8. Düber O., Künkler B., Krupp, U., Christ, H.-J., Fritzen, C.-P. Experimental characterization and two-dimensional simulation of short-crack propagation in an austenitic-ferritic duplex steel. *International Journal of Fatigue*. №28. 2006. P. 983.
 9. Моделирование процесса волочения стальной проволоки с учетом неоднородности структуры в программном комплексе SIMULIA ABAQUS / Барышников М.П., Чукин М.В., Гун Г.С., Бойко А.Б. // Пластическая деформация металлов. Днепропетровск. 2014. С. 156–158.
 10. Stolarz J. Influence of microstructure on low-cycle fatigue in some single-phase and biphasic stainless steels. *Proc. Intl. Conf. on Low Cycle Fatigue*, P.D. Portella, H. Sehitoglu, K. Hatanaka Eds. Berlin, 2004.
 11. Blochwitz C., Tirschler W. In-Situ scanning electron microscope observations of the deformation behaviour of short cracks. *Materials Science and Engineering*. 2000. P. 273.
 12. Nakajima K., Terao K., Miyata T. The effect of microstructure on fatigue crack propagation of $\alpha+\beta$ titanium alloys. *Materials Science and Engineering*. 1998. P. 176.
 13. Richter R., Tirschler W., Blochwitz C. In-situ scanning electron microscopy of fatigue crack behaviour in ductile materials. *Materials Science and Engineering*. 2001. P. 237.
 14. Williams D.B. Carter C.B. *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science*. Plenum Press. New York, 1996.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

RESEARCH METHODS OF MECHANICAL PROPERTIES OF METALS AND ALLOYS DURING THEIR FORMING SUBJECT TO AN INHOMOGENEOUS STRUCTURE

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

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

Boyko Artem Borisovich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: boyko.ab@mail.ru.

Dyja Henrik – D.Sc. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Metal Forming and Engineering Security, Czestochowa University of Technology, Poland. E-mail: dyja@wip.pcz.pl.

Nazaybekov Abdrakhman Batyrbekovich – Academician, D.Sc. (Eng.), Professor, Rector of Rudny Industrial Institute, Kazakhstan. E-mail: rector@rii.kz.

Abstract. This article presents studies of the effect of heterogeneous structural components on a stress and strain state in processes of forming metals and alloys. A review of modeling techniques including their strengths and weaknesses is made. The article presents an analysis of the microstructure of wire rod and determines a type of non-metallic inclusions for finite element modeling in a software package. A finite element method was used to model prestressing of bimetallic copper-clad steel rods and drawing of high-tensile reinforcement bars manufactured from steel grade 80R.

Keywords: inhomogeneity of the structure, microstructure, nonmetallic inclusions, finite element method.

References

1. Bichler C., Pippan R. Direct observation of the residual plastic deformation caused by a single tensile overload. *Proc. 2nd Symp. on Fatigue Crack Closure, Measurement and Analysis*, ASTM STP. 1999.
2. Christ H.-J., Mughrabi H. Cyclic stress-strain response and microstructure under variable amplitude loading. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 1996, no 19, p. 335.
3. Hertzberg R.W. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. New York: Wiley, 1996.
4. Murakami Y. *The stress intensity factors handbook*. New York: Pergamon Press, 1987.
5. Tada H., Paris P.C., Irwin, G.R. *The stress analysis handbook*. 3rd edition. New York: ASME Press, 2000.
6. Baryshnikov M.P., Chukin M.V., Boyko A.B. Analysis of software packages used to calculate a stress and strain state of composite materials in forming processes. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012, no. 4, pp. 72–74.
7. Chernyavsky A.O. The finite element method. Fundamentals of practical application [Electronic resource]. FSBEI HPE SUSU (NRU). URL: http://pent.sopro.susu.ac.ru/LRN/0711/smm/files/fea_4c.pdf.
8. Düber O., Künkler B., Krupp, U., Christ, H.-J., Fritzen, C.-P. Experimental characterization and two-dimensional simulation of short-crack propagation in an austenitic-ferritic duplex steel. *International Journal of Fatigue*, 2006, no. 28, p. 983.
9. Baryshnikov M.P., Chukin M.V., Gun G.S., Boyko A.B. Modeling of the process of drawing steel wire taking into account heterogeneity of the structure in the SIMULIA ABAQUS complex software. *Plastic deformation of metals*. Dnepropetrovsk, 2014, pp. 156–158.
10. Stolarz J. Influence of microstructure on low-cycle fatigue in some single-phase and biphasic stainless steels. *Proc. Intl. Conf. on Low Cycle Fatigue*, P.D. Portella, H. Sehitoglu, K. Hatanaka Eds. Berlin, 2004.
11. Blochwitz C., Tirschler W. In-Situ scanning electron microscope observations of the deformation behaviour of short cracks. *Materials Science and Engineering*. 2000, p. 273.
12. Nakajima K., Terao K., Miyata T. The effect of microstructure on fatigue crack propagation of $\alpha+\beta$ titanium alloys. *Materials Science and Engineering*. 1998, p. 176.
13. Richter R., Tirschler W., Blochwitz C. In-situ scanning electron microscopy of fatigue crack behaviour in ductile materials. *Materials Science and Engineering*. 2001, p. 237.
14. Williams D.B. Carter C.B. *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science*. New York: Plenum Press, 1996.

FINITE ELEMENT SIMULATION OF SHEAR STRAIN IN VARIOUS ASYMMETRIC COLD ROLLING PROCESSES

Pesin A.¹, Korchunov A.¹, Pustovoytov D.¹, Wang K.², Tang D.², Mi Z.²

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia

² University of Science and Technology Beijing, China

Abstract. Materials with ultrafine grain structure and unique physical and mechanical properties can be obtained by severe plastic deformation methods including the asymmetric rolling processes. Asymmetric rolling is a very effective way to generate ultrafine grain structures in steels, magnesium alloys and other materials. Since the asymmetric rolling is a continuous process, it has great potential for industrial production of ultrafine grain structure sheets and bars. Basic principles of asymmetric rolling are described in detail in scientific literature. Focus in the well-known works is on the possibility to control the structure of metal sheets. This study reflects the investigation findings regarding the impact of speed asymmetry on shear strain during rolling of sheet and bars in the three-roll passes. Numerical comparison of shear strain ratios in case of symmetric and asymmetric rolling is made in this study. Adequacy of the developed models is demonstrated. The results of this research work will be useful for the analysis of ultrafine grain structure evolution of metals in various asymmetric cold rolling processes.

Keywords: asymmetric rolling, finite element method, shear strain, severe plastic deformation

1. Introduction

Materials with ultrafine grain structure and unique physical and mechanical properties can be obtained by methods of severe plastic deformation (SPD), with asymmetric rolling processes among them. The basic principles of asymmetric rolling are studied and presented extensively in academic literature (Pesin et al., 2000, 2002, 2003). Asymmetric rolling is a very effective way to generate ultrafine grain (UFG) structures in steels (Lee et al., 2010), magnesium alloys (Chang et al., 2011) and other materials. Since the asymmetric rolling is a continuous process, it has great potential for industrial production of ultrafine grain structure materials (Weijun Xia et al., 2009).

It is well known that the mechanism of SPD comes from its large equivalent strain, which is composed of compressive strain and additional shear strain. Zuo et al. (2008) experimentally observed the shear strain during asymmetric rolling. Effects of reduction ratio and speed ratio on the shear strain have been studied. It has been found out that with speed ratio of 1.5 the shear strain ratio is the lowest one, and the shear deformation ratios of 1.27 and 2.1 are comparable.

Many works have studied the shear strain during asymmetric rolling by using finite element method (FEM). Ji et al. (2007) investigated deformation mechanics of differential-speed rolling with a high speed ratio between the top and the bottom rolls by rigid-plastic FEM. It has been found out that the shear strain takes a great portion of the total effective strain (~3.5) in average. Sverdlik et al. (2013) has demonstrated that during asymmetric rolling shear strain along the strip cross-section increase more than 9 times in comparison

with symmetric rolling. Ji and Park (2009) have analyzed various asymmetric rolling processes by the rigid-viscoplastic FEM. The findings of the numerical simulation have revealed that differences in size, rotational speed or friction condition between the top and the bottom rolls can cause asymmetric deformation in the sheet. Shear strain is more severe in the lower layer, where the diameter, rotational speed or friction factor is greater than in the upper layer. Kim et al. (2011) has analyzed the effect of speed ratio on the development of shear deformation and texture during differential speed rolling. FEM simulation results have shown that the effective strain accumulated during asymmetric rolling increases with high speed ratio. Angella et al. (2013) has researched the strain distribution developed during asymmetric and symmetric rolling with a large number of passes. FEM results have demonstrated that surface strain effects related to local friction between working rolls and sample surface regions promote an additional deformation leading to a significant contribution at large plastic strain and generate discrepancies between equivalent strain values assessed by continuum theories and those evaluated by FEM models. Saeed Tamimi et al. (2014) have investigated the impact of process parameters on the onset and growth of shear strain throughout the thickness of sheet samples by finite element simulations. In accordance with the FEM predictions, the experimental results have shown that the shear strain spread throughout the thickness of sheet samples during asymmetric rolling and developed the shear texture.

This study reflects the investigation findings regarding the impact of speed asymmetry on shear strain during rolling of sheet and bars in three-roll passes. Shear strain values in case of symmetric and asymmetric rolling are numerically compared in this work. Ad-

equacy of the developed models is demonstrated. The results of this research work will be useful for the analysis of ultrafine grain structure evolution of metal in various asymmetric cold rolling processes.

2. Simulation of asymmetric rolling

2.1. Asymmetric sheet rolling

Fig. 1 shows the scheme of asymmetric sheet rolling process. The circumferential speed of bottom roll V_1 is higher than that of the top roll. The sheet is rolled throughout the gap between the top and bottom rolls and as a result the thickness is reduced from h_0 down to h_1 . The deformation zone is defined by the area between the entrance and the exit. On the one hand the asymmetry factor results in reduction of negative influence of Coulomb friction forces and consequently in a possible increase of compression deformation during rolling; on the other hand additional shear strains are generated in the deformation zone. Speed asymmetry coefficient during the sheet rolling process:

$$K_v = \frac{V_1}{V_2}, \text{ where } V_1 > V_2, \quad (1)$$

where K_v – speed asymmetry coefficient between the top and the bottom rolls; V_1, V_2 – circumferential speed of the rolls.

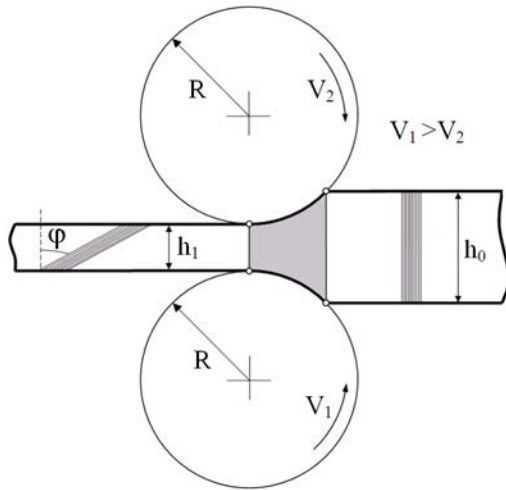


Fig. 1. Schematic illustration of asymmetric sheet rolling

Equivalent strain ε_i can be calculated by the following equation:

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{2}{3} e_{ij} e_{ij}}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{2}{9} [(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + 6(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{31}^2)]}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_x, \varepsilon_{22} = \varepsilon_y,$$

$$\varepsilon_{33} = \varepsilon_z, \varepsilon_{12} = \frac{\gamma_{xy}}{2}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{23} = \frac{\gamma_{yz}}{2}, \varepsilon_{31} = \frac{\gamma_{zx}}{2},$$

As asymmetric sheet rolling is the plane-strain, that is

$$\varepsilon_x = -\varepsilon_y, \varepsilon_z = 0, \gamma_{yz} = 0, \gamma_{zx} = 0. \quad (5)$$

Then Eq. (3) can be refined as

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{4\varepsilon_y^2 + \gamma_{xy}^2}. \quad (6)$$

Fig. 2 shows a schematic illustration of change in a single grid before and after asymmetric sheet rolling.

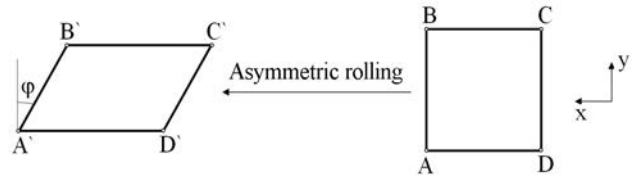


Fig. 2. Change in a single grid before and after asymmetric sheet rolling

Square ABCD becomes shape A'B'C'D' after asymmetric rolling. The thickness of the square is reduced in "y" direction and the length is elongated towards "x" direction. In addition angle $\angle BAD$, which was originally 90 degrees, is decreased by a shear stress by ϕ angle. The shear strain component (γ_{xy}) can be calculated, respectively, as follows,

$$\gamma_{xy} = \text{tg}\phi. \quad (7)$$

Eq. (7) represents the shear strain during asymmetric sheet rolling. More detailed analyses of irregular distribution of shear strain across sheet thickness have been carried out by FEM simulation.

2.2. Finite element simulation of asymmetric sheet rolling

Commercial software DEFORM 2D/3D, based on FEM, was used to analyze asymmetric sheet rolling process. In the course of simulation the following as-

Table 1

assumptions were made: 1) plane strain of metal; 2) material under deformation – hardened rigid-plastic material; 3) work rolls – absolutely rigid; 4) conditions of deformation – isothermal. A Coulomb friction model was used between rolls and metal bar which assumes that no relative motion occurred if the equivalent frictional stress was less than a critical value. The friction coefficient was calibrated by experimental tests and FEM simulations. Friction coefficient μ was equal to 0.24.

The material of the sheet was CuZn5 and the yield stress at 20°C was set by

$$\sigma = 109 + 26.7\varepsilon^{0.64}, \quad (8)$$

where σ was the yield stress and ε was the effective strain.

Rolling was carried out with rolls of 100 mm in diameter. The circumferential speed of the rolls was set at $V_2=0.2$ m/sec. Speed asymmetry coefficient was set at $K_v = 1.0$; 1.16; 2.0. In the course of simulation of asymmetric sheet rolling process the influence of the speed asymmetry coefficient on distribution of shear strain γ_{xy} throughout the sheet thickness was studied. The strip was cold rolled to achieve final 70% thickness reduction in three passes (Table 1).

Pass schedule

Pass No.	0	1	2	3
Thickness, mm	0.80	0.42	0.32	0.24
Reduction, %	0	47.5	23.8	25.0

Fig. 3 shows the flow net and distribution of shear strain throughout the strip thickness after cold rolling to 70% of thickness reduction with the different values of the speed asymmetry coefficient K_v . Shear strain is distributed irregularly throughout the cross section of the strip in all cases of rolling. In case of symmetric rolling ($K_v=1.0$) the shear strain is maximum (~ 0.9) on the top and bottom surfaces of the strip. In the middle of the strip the shear strain during symmetric rolling is zero (Fig. 3d). The larger the speed asymmetry coefficient the higher the shear strain is, particularly on the bottom surface of the strip where the roll has faster circumferential speed. With $K_v=1.16$ the shear strain of the bottom surface of the strip is ~ 1.6 , and with $K_v=2.0$ the shear strain is equal to ~ 3.1 (Fig. 3d). For verification of the numeric modeling results the following experimental analysis has been carried out.

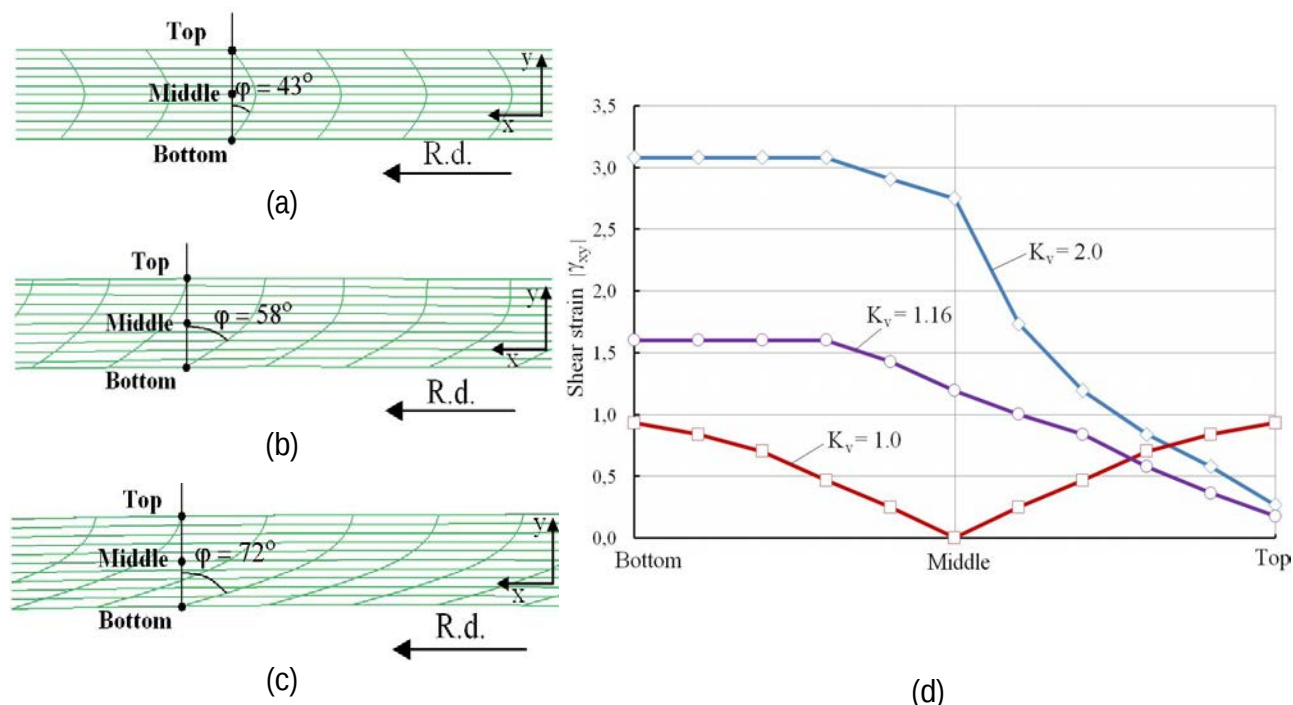


Fig. 3. Flow net after cold rolling to 70% of thickness reduction with the value of speed asymmetry coefficient $K_v = 1.0$ (a), $K_v = 1.16$ (b), $K_v = 2.0$ (c) and distribution of shear strain throughout the strip thickness (d) (R.d. – rolling direction)

2.3. Experimental details and discussion

The study was carried out on CuZn5 samples with dimensions of 0.8×30×150 mm (thickness×width×length). The material was cold rolled to a final 70% thickness reduction in three passes (Table 1). Rolling was performed on a laboratory mill (Fig. 4a), in which the working rolls had equal diameters of 100 mm. Rolling was carried out at constant circumferential speed of the bottom roll maintained at 0.2 m/sec, and with the variable velocity of the top one. No lubrication was introduced to the rolls. The following values of the speed asymmetry coefficient R_v were applied: $R_v = 1.0$ – symmetric rolling with equal speed of both rolls; $R_v = 1.16$ and $R_v = 2.0$ – asymmetric rolling, in which the circumferential speed of the bottom roll is, respectively 1.16 and 2.0 – times more than the speed of the top one.

Speed asymmetry was generated by means of replaceable gear wheels (Fig. 4b) of the pinion stand of the rolling mill main line. The drive pinion gear having 25 teeth was mounted on the driving shaft. The replaceable gear wheels having 29 and 50 teeth were mounted on the driven idle shaft.

The microstructures of the samples before (Fig. 5) and after cold rolling (Fig. 6) were examined

with a scanning electron microscope (SEM, JSM-6490LV) at accelerating voltage of 20 kV. The research was carried out with microslides used for optical microscopy in secondary and reflected electron modes with 5000 magnification.

Examination of the structure throughout the cross section of the strip was carried out in accordance with the scheme (Fig. 3). The analysis showed that the metal structure throughout the cross section of the strip is inhomogeneous. It was explained by irregular distribution of shear strain across the thickness. In case of symmetric rolling ($K_v = 1.0$) in the middle of the strip there were no signs of UFG structure formation (Fig. 6b) due to the absence of shear strain in this zone. In its turn in case of asymmetric rolling the grain fragmentation took place down to $\sim 1.0 \mu\text{m}$ along with speed asymmetry coefficient increase, in particular at $K_v = 2.0$. At that the greatest effect was achieved on the bottom surface of the strip (Fig. 6i), i.e. in that part of the strip where the shear strains were maximum (Fig. 3c). Thus the microstructure modification throughout the cross section of the strip was in accordance with the results of the numerical modeling of shear strain distribution across the thickness.

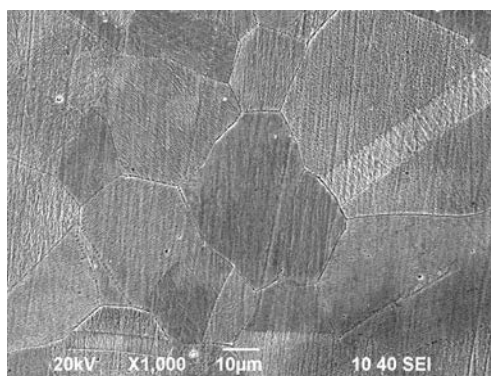


(a)

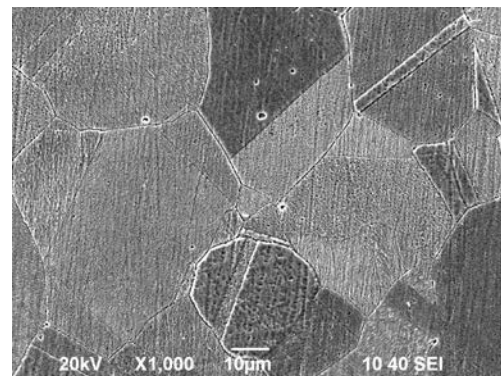


(b)

Fig. 4. Laboratory mill (a) and replaceable gear wheels (b)



(a)



(b)

Fig. 5. SEM micrographs of bottom surface (a) and middle (b) of the sample CuZn5 at the annealed condition

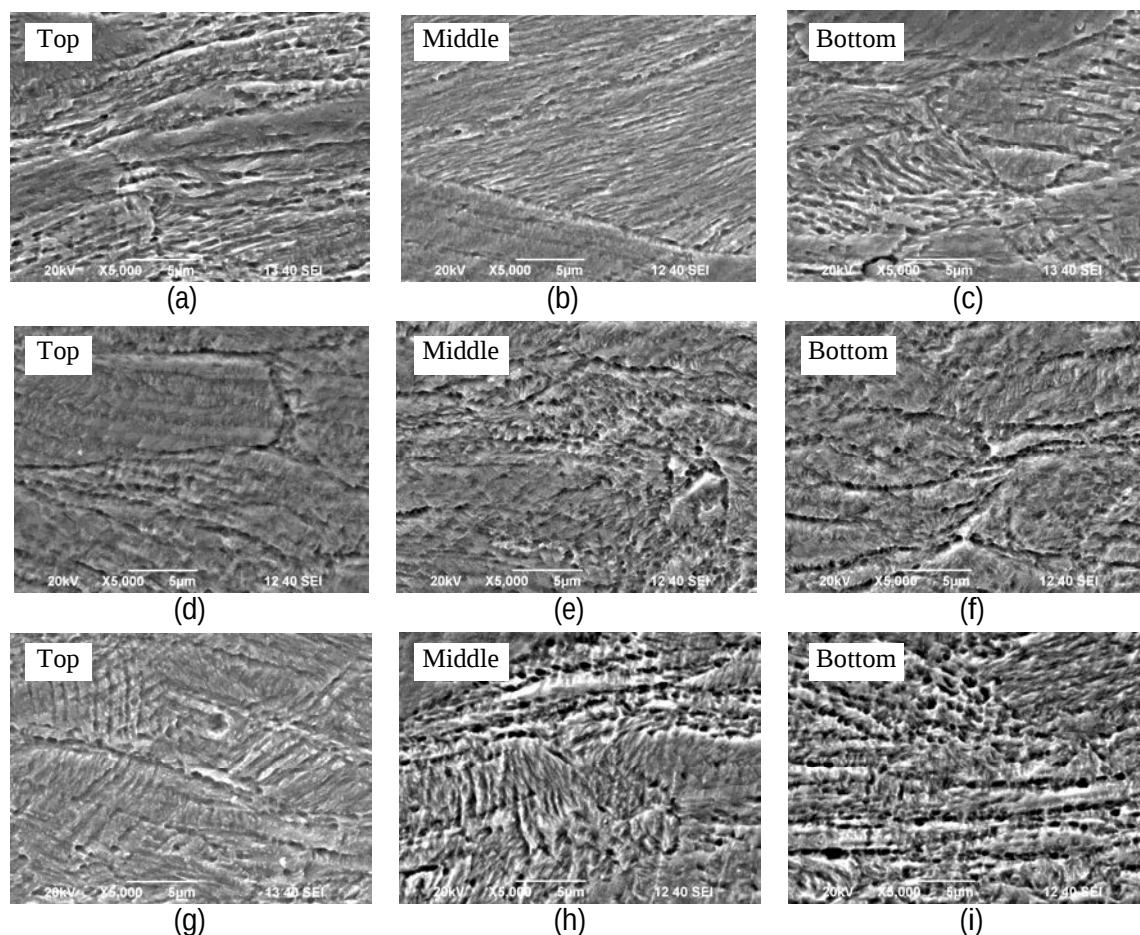


Fig. 6. SEM micrographs of CuZn5 after rolling to 70% of thickness reduction with the value of the speed asymmetry coefficient $K_v = 1.0$ (a, b, c), $K_v = 1.16$ (d, e, f), $K_v = 2.0$ (g, h, i)

The mechanical properties of the samples before and after cold rolling were investigated by uniaxial tensile test using an AG IC Shimadzu universal testing machine equipped with a 50 kN load cell. The tests were computer controlled registering strain and stress (Fig. 7). Tensile samples with a gauge section measuring 30 mm in width and 100 mm in length were cut from the strips along the rolling direction. Tensile tests were carried out at room temperature and a constant cross-head speed of 2 mm/min, which was equivalent to a strain rate of $3.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

The quantitative characteristics of the curves in Fig. 7 are described in Table 2. The analysis of the mechanical test results revealed that with augmentation of speed asymmetry coefficient K_v from 1.0 up to 2.0 the strength properties of CuZn5 got better and plastic properties remained unchanged (Table 2). In particular the yield strength (YS) increased from 478 MPa (at $K_v = 1.0$) up to 567 MPa (at $K_v = 2.0$), and the ultimate tensile strength (UTS) in-

creased from 509 MPa (at $K_v = 1.0$) up to 603 MPa (at $K_v = 2.0$). In case of symmetric and asymmetric rolling with total reduction of 70% the uniform elongation and elongation to failure were extremely low and did not exceed 2% (Table 2).

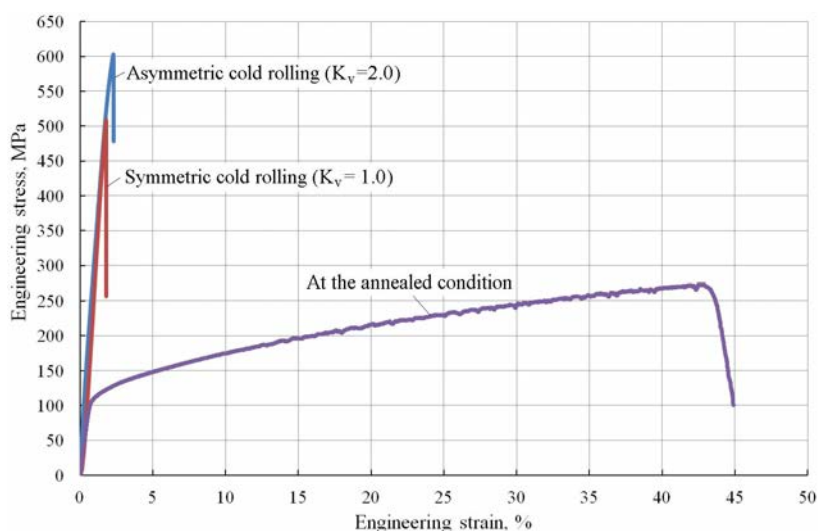


Fig. 7. Engineering stress-strain curves of the samples processed under various conditions

Table 2
Quantitative characteristics
of the tensile stress-strain curves in Fig. 7

Conditions	Mechanical properties			
	UTS (MPa)	YS (MPa)	Uniform elongation (%)	Elongation to failure (%)
At the annealed condition	273	109	41	45
After symmetric cold rolling to 70% of thickness reduction with the value of the speed asymmetry coefficient $K_v = 1.0$	509	478	1.30	1.99
After asymmetric cold rolling to 70% of thickness reduction with the value of the speed asymmetry coefficient $K_v = 2.0$	603	567	1.36	1.88

Therefore the results of calculation and of the experiment show that the suggested mathematical model is appropriate.

2.4. New method of asymmetric rolling of metal bars in the three-roll pass

In order to get high-strength metal materials with ultrafine grain structure there has been developed an original way of asymmetric rolling in the three-roll pass with additional shear strain due to work roll

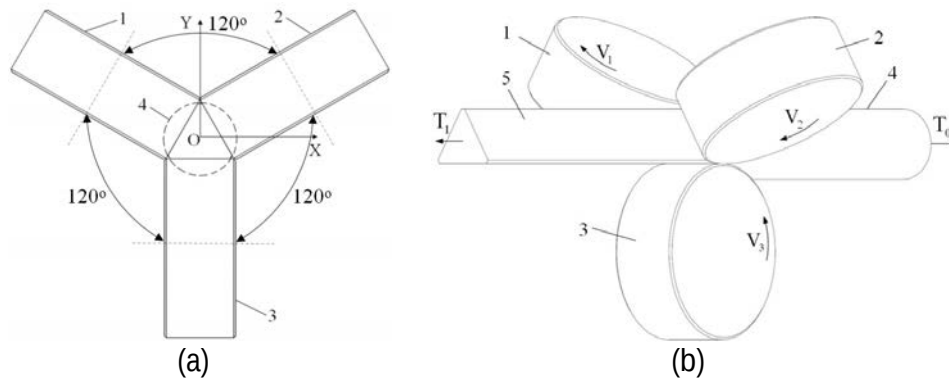


Fig. 8. Arrangement of rolls (a) and the scheme of asymmetric rolling in the three-roll pass (b) (1, 2, 3 – work rolls; 4 – original bar; 5 – resulting triangle section)

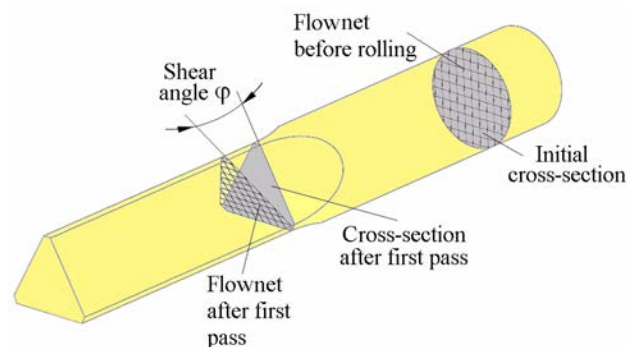


Fig. 9. Schematic illustration of shear angle φ during asymmetric rolling in the three-roll pass

speed asymmetry (Fig. 8). Speed asymmetry coefficient in the three-roll pass:

$$K_v^{1-2} = \frac{V_1}{V_2}, K_v^{2-3} = \frac{V_2}{V_3},$$

$$K_v^{1-3} = \frac{V_1}{V_3}, \text{ where } V_1 = V_2 > V_3, \quad (9)$$

where K_v^{1-2} , K_v^{2-3} , K_v^{1-3} – speed asymmetry coefficient between work rolls 1 and 2, 2 and 3, 1 and 3, correspondingly; V_1 , V_2 , V_3 – circumferential speeds of rolls.

At the indicated conditions in the contact areas between the metal bar and rolls 1 and 2 the backward creep zone gets longer where the direction of tangential friction forces is along the metal bar movement. In its turn in the contact area between the metal bar and roll 3 the forward creep zone gets longer where the direction of tangential friction forces is opposite the metal bar movement. Thus in the deformation zone the oppositely directed tangential friction forces generate additional shear strains with shear angle φ (Fig. 9). The tangent of this angle is the characteristic of shear strain.

2.5. Finite element simulation of asymmetric rolling in the three-roll pass

A commercial software DEFORM 2D/3D was used to analyze asymmetrical rolling process in the three-roll pass. A CuZn5 round bar with radius of $r=2\text{ mm}$ (Fig. 10) (see formula 8) was used as an original bar. Rolling was performed with smooth rolls having the roll body of $R=180\text{ mm}$. The circumferential speed of roll 3 was set equal to $V_3=1.0\text{ m/sec}$. Speed asymmetry coefficient were set equal:

$$K_v^{1-2}=1.0, \quad K_v^{2-3}=K_v^{1-3}=1.0\dots 1.7.$$

Coulomb friction law was used. The friction coefficient μ when the metal bar contacted the work rolls varied within the range of $0.12\dots 0.36$. The front tension $T_1 = 60\text{ MPa}$, the back tension $T_0 = 30\text{ MPa}$. To approximate the geometric parameters of the bar, tetrahedral elements were used. Rolling process was carried out with high elongation ratio per pass:

$$\frac{S_0}{S_1}=1.7, \text{ where } S_0 \text{ is the cross section area of the}$$

bar prior to deformation; S_1 is the cross section area of the bar after the deformation. This elongation ratio corresponds to the reduction ratio 41.2%. In the course of simulation the impact of speed asymmetry on shear strain was assessed during rolling of the bar in the three-roll pass as per round-triangle scheme. The shear strain was assessed as per the value of shear angle φ .

In case of symmetric rolling ($K_v^{1-3}=1.0$) of the bar in the three-roll pass the shear angle φ is zero (Fig. 11a). In its turn during asymmetric rolling

the material undergoes significant shear strain. The maximum value of the shear angle $\varphi = 48^\circ$ (Fig. 11b) is achieved with the speed asymmetry coefficient of $K_v^{1-3}=1.7$ and high value of the friction coefficient $\mu = 0.36$. The explanation is that the additional shear strain during asymmetric rolling in the three-roll pass is generated by oppositely directed tangential friction forces in the deformation zone. That is why the ratio of the shear strain significantly increases along with simultaneous augmentation of the speed asymmetry coefficient and contact friction coefficient. However it should be noted that distribution of shear strain throughout the cross section of the bar is irregular. The maximum shear strain appears on the contact surface between the bar and roll 3 having the lowest circumferential speed. The value of shear angle $\varphi = 48^\circ$ achieved during the asymmetric rolling in three-roll pass by one deformation pass with reduction ratio of 41.2% is well in accordance with the values achieved during equal-channel angular pressing per one pass (Furukawa et al., 2001).

Fig. 12 illustrates interrelation between the shear angle φ , speed asymmetry coefficient K_v^{1-3} and contact friction coefficient μ . During asymmetric rolling in the three-roll pass the shear strain φ increases from 0 up to 48 degrees that is equivalent to shear strain 1.1. Thus the findings of the research carry inference that the asymmetric rolling process in the three-roll pass can be utilized as an SPD method for manufacturing of plain long bars with UFG structure.

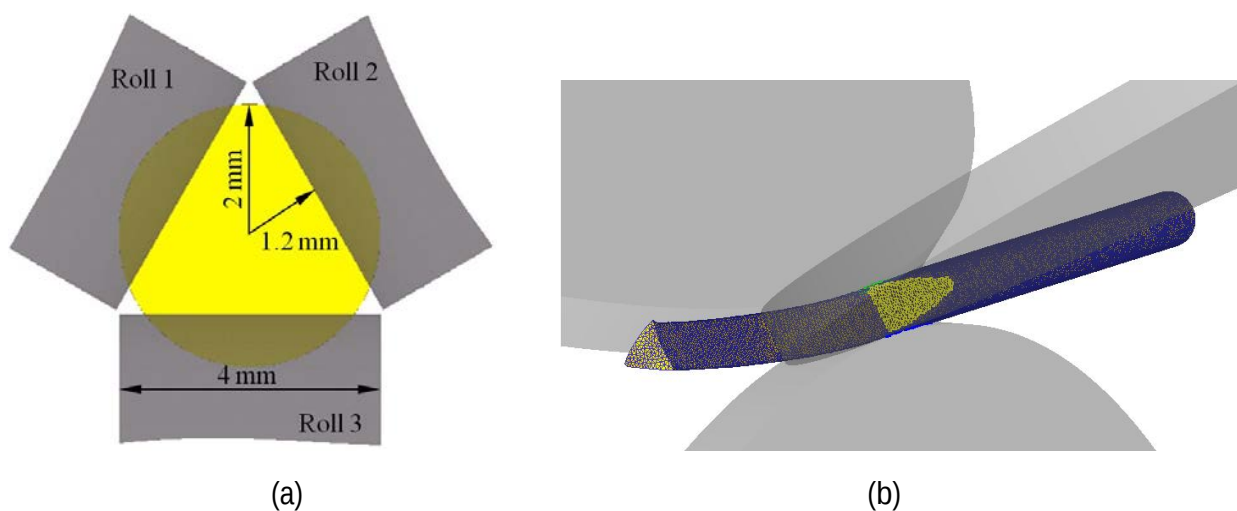


Fig. 10. Dimensions of the bar and rolls (a) and finite element model (b)

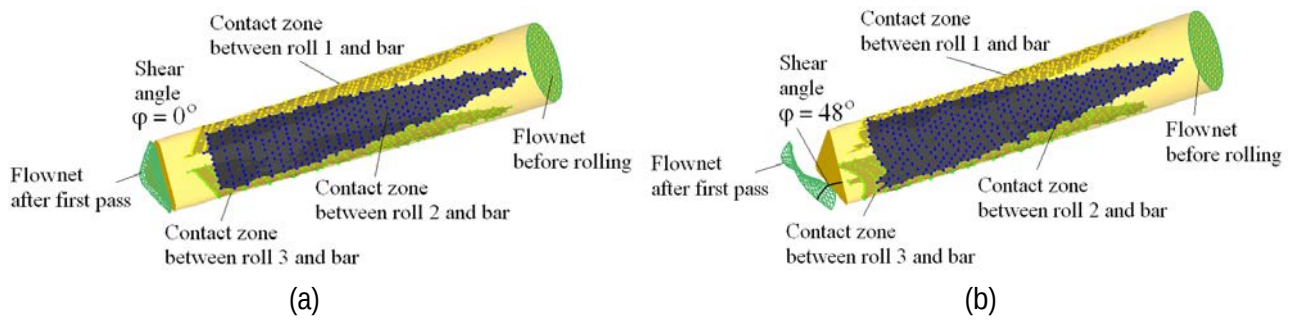


Fig. 11. Shear angle φ during symmetric (a) and asymmetric (b) rolling in three-roll pass

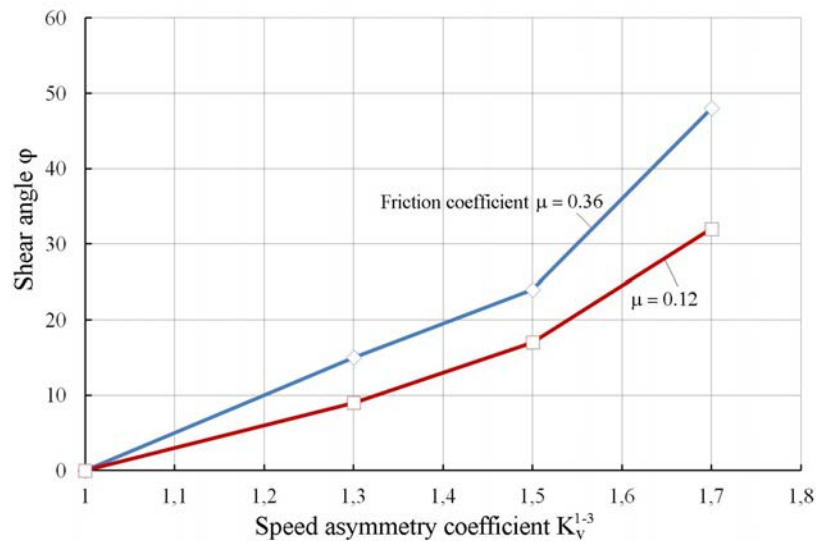


Fig. 12. Influence of the speed asymmetry coefficient K_v^{1-3} on the shear angle φ during asymmetric rolling in the three-roll pass

One of the problems of asymmetric rolling in the three-roll pass is bending of the bar at the exit from the deformation zone what makes its threading into the next pass more difficult. The solution of this problem can be utilization of special twin stands with individual work roll drive enabling installation of subsequent three-roll passes as close to each other as possible (Tkachenko et al., 2012). Further investigation of the shear strain and microstructure evolution during deformation of metal in the three-roll pass is required.

3. Conclusions

In case of symmetric rolling ($K_v = 1.0$) with total reduction of 70% the shear strain is zero in the middle of the strip and maximum (~ 0.9) on the bottom and top surfaces of the strip. The larger the speed asymmetry coefficient the higher the shear strain is, particularly on the bottom surface of the strip where the roll has faster circumferential speed. With $K_v = 1.16$ the shear strain on the bottom surface is

~ 1.6 , and with $K_v = 2.0$ the shear strain is ~ 3.1 . After cold rolling CuZn5 structure throughout the cross section of the strip is irregular what is explained by irregular distribution of shear strain across the thickness. In case of symmetric rolling there are no signs of UFG structure formation in the middle of the strip due to the absence of shear strain in this zone. During asymmetric rolling the grain fragmentation takes place down to $\sim 1.0 \mu\text{m}$ along with speed asymmetry coefficient increase. A new method of asymmetric rolling of bars in the three-roll pass is suggested. On the basis of the finite element simulation it is stated that with reduction ratio of 41.2% in the course of increase of speed asymmetry coefficient K_v^{1-3} from 1.0 up to 1.7 and along with the friction coefficient increase from 0.12 up to 0.36 the shear angle φ grows from 0 up to 48 degrees what is equivalent to shear strain 1.1. This new method can be utilized as an SPD method for manufacturing of plain long bars with UFG structure.

References

1. Pesin A., Salganik V., Trahtengertz E., Drigun E., 2000. Development of the asymmetric rolling theory and technology. Proceedings of the 8-th International Conference on Metal Forming 2000, 311-314.
2. Pesin A., Salganik V., Trahtengertz E., Cherniahovsky M., Rudakov V., 2002. Mathematical modeling of the stress-strain state in asymmetric flattening of metal band. Journal of Materials Processing Technology 125-126, 689-694.
3. Pesin A., 2003. Practical results of modeling asymmetric rolling. Steel in Translation 33, 46-49.
4. Pesin A.M., 2003. New solutions on basis of non-symmetric rolling model. Stal, 66-68.
5. Kyung-Moon Lee, Hu-Chul Lee, 2010. Grain refinement and mechanical properties of asymmetrically rolled low carbon steel. Journal of Materials Processing Technology 210, 1574-1579.
6. Chang L.L., Cho J.H., Kang S.B., 2011. Microstructure and mechanical properties of AM31 magnesium alloys processed by differential speed rolling. Journal of Materials Processing Technology 211, 1527-1533.
7. Weijun Xia, Zhenhua Chen, Ding Chen, Suqing Zhu, 2009. Microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheets produced by differential speed rolling. Journal of Materials Processing Technology 209, 26-31.
8. Zuo Fang-qing, Jiang Jian-hua, Shan Ai-dang, Fang Jian-min, Zhang Xing-yao, 2008. Shear deformation and grain refinement in pure Al by asymmetric rolling. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 18, 774-777.
9. Ji Y.H., Park J.J., Kim W.J., 2007. Finite element analysis of severe deformation in Mg-3Al-1Zn sheets throughout differential-speed rolling with a high speed ratio. Materials Science and Engineering A 454-455, 570-574.
10. Sverdlik M., Pesin A., Pustovoytov D., Perekhovich A., 2013. Advanced Materials Research 742, 476-481.
11. Ji Y.H., Park J.J., 2009. Development of severe plastic deformation by various asymmetric rolling processes. Materials Science and Engineering A 499, 14-17.
12. Kim W.J., Hwang B.G., Lee M.J., Park Y.B., 2011. Effect of speed-ratio on microstructure, and mechanical properties of Mg-3Al-1Zn alloy, in differential speed rolling. Journal of Alloys and Compounds 509, 8510-8517.
13. Angella G., Esfandiar Jahromi B., Vedani M., 2013. A comparison between equal channel angular pressing and asymmetric rolling of silver in the severe plastic deformation regime. Materials Science and Engineering A 559, 742-750.
14. Saeed Tamimi, João P. Correia, Augusto B. Lopes, Said Ahzi, Frederic Barlat, Jose J. Gracio, 2014. Asymmetric rolling of thin AA-5182 sheets: Modelling and experiments. Materials Science and Engineering A 603, 150-159.
15. Furukawa M., Horita Z., Nemoto M., Langdon T.G., 2001. Review: Processing of Metals by Equal-channel Angular Pressing. Journal of Material Science 36, 2835-2843.
16. Tkachenko A., Eremin A., Gorkin N., Birykov M., 2012. Cassette-type stand with dual adjustable gauges for three-roll rolling of section bars. Modeling and development of metal forming processes, 237-244.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СДВИГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ПРОЦЕССАХ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ

Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Корчунов А.Г., Ванг К., Танг Д., Ми Ж.

Аннотация. Материалы с ультрамелкозернистой структурой и уникальными физическими и механическими свойствами могут быть получены с использованием методов интенсивной пластической деформации. Асимметричная прокатка является одним из наиболее эффективных способов получать такую структуру в сталях, сплавах магния и в других

материалах. В настоящей работе приведены результаты исследования влияния скоростной асимметрии на сдвиговые деформации при листовой прокатке и прокатке в многовалковых калибрах.

Ключевые слова: асимметричная прокатка, конечно-элементное моделирование, сдвиговая деформация, интенсивная пластическая деформация.

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.771.23

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

Чукин М.В.¹, Салганик В.М.¹, Полецков П.П.¹, Денисов С.В.²,
Кузнецова А.С.¹, Бережная Г.А.¹, Гущина М.С.¹

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

² Магнитогорский металлургический комбинат, Россия

Аннотация. В статье рассмотрена актуальность освоения стратегически важной для РФ технологии производства высокопрочных сталей и листового проката, предназначенных для импортозамещения. Освоение указанной продукции планируется в условиях ОАО «ММК» совместно с учеными МГТУ при поддержке Минобрнауки России.

Ключевые слова: наноструктурированные высокопрочные стали, листового прокат, механические свойства, импортозамещение, машиностроение.

Введение

Одним из стратегических направлений развития отечественной экономики в целом и металлургической промышленности России в частности является активное внедрение наукоемких технологий с применением последних инновационных достижений. Это диктует необходимость создания принципиально новых материалов, а также разработки сталей и листового проката, обладающего комплексом трудносочетаемых свойств.

Освоение технологии производства новых марок сталей для импортозамещения

Основными потребителями высокопрочного листового металлопроката являются предприятия машиностроительного комплекса. Последний в свою очередь является одним из ключевых секторов экономики, уровень развития которого в значительной степени определяет состояние экономического потенциала Российской Федерации, ее конкурентоспособность на внутреннем и мировом рынках, а также обороноспособность государства [1, 2].

В связи с этим стратегически важным для РФ является создание и освоение технологии производства аналогов импортных высокопрочных броневых сталей типа:

- MARS 190-300 (Creusot-Loire Industrie, Франция);
- Miilux PROTECTION 320T-500T (Miilux Ltd, Финляндия);

– Ramor 400-500 (Rautaruukki Corporation, Финляндия);

– ARMOX 370T-600T (SSAB, Швеция).

Для автомобильной отрасли и кранового хозяйства стратегия импортозамещения также включает разработку, освоение и производство импортных аналогов типа:

– Hardox, Domex, Weldox, Toolox (SSAB, Швеция) [3, 4];

– Raex, Optim (Rautaruukki Corporation, Финляндия);

– Aldur, Alform, Durostat (voestalpine Stahl GmbH, Австрия);

– Dillidur, Dillimax (Dillinger Hütte GTS, Германия) [5].

Учеными ФГБОУ ВПО «МГТУ» совместно с ОАО «ММК» – одним из ведущих российских металлургических предприятий – при поддержке Минобрнауки России начата реализация комплексного проекта по разработке инновационного процесса производства импортозамещающего наноструктурированного листового проката с уникальным комплексом механических свойств. Данный проект реализуется в рамках постановления Правительства РФ №218. Цель и задачи проекта соответствуют Приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Индустрия наносистем», утвержденному Указом Президента РФ №899 от 7 июля 2011 года.

Необходимость и актуальность продвижения рассматриваемого проекта связана со значительным увеличением потребности в высокопрочном

листовом прокате. О высокой востребованности высокопрочного проката на российском рынке свидетельствуют результаты маркетинговых исследований (см. таблицу).

Потребление высокопрочного импортного проката

Назначение	Марка	Потребность по годам, тыс. т						Фирма	Страна	Член ЕС, НАТО
		2015	2016	2017	2018	2019	2020			
Оборонная промышленность	MARS 190-300							Creusot-Loire Industrie	Франция	ЕС, НАТО
	Milux Protection 320T-500T							Milux Ltd	Финляндия	ЕС
	Ramor 400-500							Rautaruukki Corporation		
	Armox 370T-600T									
Крановая отрасль	Domex 240 YP, Domex 315MC-700MC, Domex 960							SSAB	Швеция	ЕС, НАТО
	Docol 900M-1500M									
Автомобильная промышленность	Raex 300-500	180	190	165	170	175	185	Rautaruukki Corporation	Финляндия	ЕС
	Aldur 500-700 Q, QL, QL1							Voestalpine Stahl GmbH	Австрия	
Мостостроение	Alform plate 355M-550M							Rautaruukki Corporation	Финляндия	
Тяжелое машиностроение	Durostat 400-500									
	Optim 500MC-700MC									
	Weldox 700-1300, Hardox 400-600, HiTuf, Extreme							SSAB	Швеция	ЕС, НАТО
Машиностроение	Toolox 33-44									

Наибольшим спросом на российском рынке пользуется импортный листовой прокат для кранового производства. Интерес к зарубежным производителям обусловлен конкурентной ценой, возможностью поставки небольшими партиями (30–60 т), гибкими условиями оплаты, наличием комплексной технической поддержки клиента.

Потребителями износостойкого листового проката являются в основном предприятия машиностроительного комплекса (для изготовления конструкций зубьев экскаваторных ковшей, дробилок, несущих частей горнодобывающих машин и других деталей, подверженных высокой степени износа). Их интерес обусловлен в значительной степени отсутствием на рынке российских аналогов гарантированного уровня качества соизмеримой стоимости.

Хладостойкий высокопрочный листовой прокат представляют такие стали, как Weldox 900-1300 и Dillimax 890-1100. Прокат из этих сталей широко востребован при производстве несущих конструкций транспортной техники, эксплуатируемой в условиях Крайнего Севера.

Высокопрочный высокотвердый листовой прокат, предназначенный для противопульной защиты корпусов транспортных средств гражданского (бронированные автомобили, инкассаторские машины) и военного назначения (спецавтотехника), имеет небольшой процент потребления ввиду особенностей рынка, в том числе ввиду его закрытости для иностранных поставщиков и ориентации на отечественного производителя.

Доля импорта инструментального листового проката (из сталей марок типа Toolox) составляет менее 1%. Поскольку такие стали применяют для слесарно-монтажных, деревообрабатывающих, режущих и штамповочных инструментов, в Россию они попадают в виде импорта непосредственно готовых изделий, следовательно, и потребление заготовок для их производства (т.е. инструментального листового проката) практически отсутствует.

Характеристика объекта разработки

В рамках комплексного проекта к выпуску планируется инновационная продукция – наноструктурированный высоко-

прочный листовой прокат с уникальным сочетанием механических свойств (прочность 700–2000 Н/мм², твердость свыше 280 НВ, удлинение не менее 8%), получаемым вариацией химического состава, режимов прокатки и термообработки. Другой особенностью предлагаемой продукции являются ее геометрические размеры – ширина проката достигает 4800 мм (минимальная ширина 1500 мм). Общий диапазон толщин составит от 6 до 80 мм при преимущественной доле тонкого сортамента (менее 8 мм). Следовательно, большое внимание будет уделено проблемам получения высокой плоскостности.

Объединение указанных выше основных характеристик разрабатываемой продукции будет обобщено в высокой технологии ее производства с подходами и принципами наноструктурирования.

Планируемый к выпуску наноструктурированный высокопрочный листовой прокат предназначен для следующего применения:

1) для противопульной защиты корпуса транспортных средств – высокопрочный высокотвердый листовой прокат;

2) для тяжелой подъемно-транспортной техники – высокотвердый износостойкий листовой прокат;

3) для кранового производства и легкой транспортной техники – высокопрочный листовой прокат;

4) для несущих конструкций транспортной техники – хладостойкий высокопрочный листовой прокат;

5) для высокоточного машиностроительного оборудования – инструментальный высокопрочный листовой прокат.

Гарантией успешного достижения целей выполняемого проекта является использование оборудования, имитирующего реальные процессы производства стали и проката, ООО «Термодеформ-МГТУ» [6] и центра коллективного пользования научным оборудованием «Научно-исследовательский институт наносталей» при ФГБОУ ВПО «МГТУ», позволяющее осуществлять поиск технологических режимов производства новых высокопрочных сталей и листового проката, предназначенных для импортозамещения.

Заключение

Проведен анализ стратегических направлений новых материалов на основе высокопрочных сталей. Определены основные позиции аналогов импортных высокопрочных сталей, планируемых к производству в рамках комплексного проекта.

Список литературы

1. Минэкономразвития России. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года. URL: <http://www.economy.gov.ru/minec/activity/sections/macro/prognoz>.
2. Стратегия развития черной металлургии России на 2014-2020 годы и на перспективу до 2030 года: приказ Минпромторга России от 05.05.2014 №839. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_165502/.
3. Глинер Р.Е. Разработки в области производства высокопрочной листовой стали в Швеции (сталь Domex, Docol, AHSS) // Производство проката. 2009. 10. С. 11–18.
4. Дьяков М. А. Износостойкие детали HARDOX - Ваше конкурентное преимущество // Горная промышленность. 2013. №5. С. 45.
5. Износостойкие стали для добычи сырьевых материалов: [сталь марки Dillidur 450 V и Dillimax 690 E для металлургического оборудования] // Черные металлы. 2014. №3. С. 102–103.
6. Физическое моделирование процессов производства горячекатаного листа с уникальным комплексом свойств / В.М. Салганик, С.В. Денисов, П.П. Полецков, П.А. Степанов, Г.А. Бережная, Д.Ю. Алексеев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 3. С. 37–39.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

MAIN TYPES AND APPLICATION OF NANOSTRUCTURED HIGH-STRENGTH SHEET PRODUCTS

Chukin Mikhail Vitalevich – D.Sc. (Eng.), Professor, First Vice-Rector, Vice-Rector for Science and Innovation, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 3519 298 526. E-mail: m.chukin@mail.ru.

Salganik Viktor Matveevich – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Metal Forming Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 3519 298 506.

Poletskov Pavel Petrovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 3519 298 525. E-mail: pavel_poletskov@mail.ru.

Denisov Sergey Vladimirovich – D.Sc. (Eng.), Head of Central Laboratory, OJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works», Russia.

Kuznetsova Alla Sergeevna – Research Associate, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 3519 328 512. E-mail: allakuznetsova.mgtu@mail.ru.

Berezhnaya Galina Andreevna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 3519 298 525. E-mail: galina_1609@mail.ru.

Gushchina Marina Sergeevna – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 3519 298 525. E-mail: marina.mgn.89@mail.ru.

Abstract. The article deals with relevant development of the production technology of high-strength steels and sheet products, which are strategically important for the Russian Federation and intended for import substitution. Development of the specified products is planned in the conditions of OJSC MMK together with NMSTU academics and supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

Keywords: nanostructured high-strength steels, sheet

products, mechanical properties, import substitution, mechanical engineering.

References

1. The Ministry of Economic Development of the Russian Federation: The Long-Term Socio-Economic Development Forecast for the Russian Federation till 2030. Available at <http://www.economy.gov.ru/minec/activity/sections/macro/prognoz>.
2. The Russian steel industry development strategy for 2014–2020

- and till 2030: Order of the Ministry of Industry and Trade of Russia No. 839 dated 05.05.2014. Available at http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_165502/.
3. Gliner R.E. Development in the field of high-strength sheet steel in Sweden (Domex, Docol, AHSS). *Proizvodstvo prokata* [Rolled Products Manufacturing], 2009, no. 10, pp. 11-18 (in Russ.).
 4. Dyakov M.A. HARDOX wear-resistant parts - your competitive advantage. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 2013, no. 5, pp. 45. (in Russ.).
 5. Wear-resistant steels for mining of raw materials: [Dillidur 450 V and Dillimax 690 E for metallurgical equipment]. *Chernye metally* [Ferrous metals], 2014, no. 3, pp. 102-103 (in Russ.).
 6. Salganik V.M., Denisov S.V., Poletskov P.P., Stekanov P.A., Berezhnaya G.A., Alekseev D.Yu. Physical Modeling of Production Processes of Hot Rolled Plates with a Unique Set of Properties. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 3, pp. 37-39 (in Russ.).

УДК 669.01

ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ СТАРЕНИЕ ЭКОНОМНО ЛЕГИРОВАННОЙ ДУПЛЕКСНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Калляри И.¹, Бреда М.¹, Фриго М.², Пеллиццари М.³, Рамоус Э.¹¹ Кафедра промышленного производства Падуанского университета, Италия² Outokumpu S.p.A., Генуя, Италия³ Кафедра промышленного производства университета Тренто, Италия

Аннотация. Благоприятное сочетание механических свойств и устойчивости к коррозии в дуплексных нержавеющих сталях (DSS) обусловлено двухфазной микроструктурой стали, в которой примерно в равном объеме содержатся феррит и аустенит. Однако во всех сталях типа DSS наблюдаются процессы выделения вторичных фаз, особенно в интервале температур 600–1000°C, которые могут происходить даже в течение весьма не продолжительных периодов выдержки, ухудшая притягательные свойства этих сталей.

Основной вторичной фазой, наблюдаемой в сталях типа DSS, является интерметаллическая σ -фаза, которая образуется из феррита в результате эвтектоидного распада при высоких температурах и обычно сопровождается образованием ещё одной интерметаллической фазы – χ -фазы. Выделение данных фаз наблюдается в основном в высоколегированных марках стали DSS, в то время как в «легких» сталях DSS с меньшим содержанием легирующих элементов они не отмечаются, возможно, благодаря пониженному содержанию хрома и молибдена. Напротив, во всех марках стали DSS обычно наблюдается выделение нитридов.

В данной статье рассматривается кинетика выделения вторичных фаз на примере двух марок экономно легированной дуплексной нержавеющей стали после изотермической обработки в межкритическом интервале температур. В стали марки LDX 2101 были обнаружены только нитриды, в то время как в LDX 2404 наблюдалось значительное выделение σ -фазы, если продолжительность выдержки составляла более часа.

Ключевые слова: экономно легированные дуплексные нержавеющие стали, изотермическая обработка, σ -фаза, нитрид хрома, кинетика выделения вторичных фаз.

Введение

Дуплексные нержавеющие стали (DSS) – это двухфазные аустенитно-ферритные нержавеющие стали, в которых присутствие обеих фаз в равных объемных долях обеспечивает хорошие механические свойства металла в сочетании с высокой коррозионной стойкостью. Они представляют большой интерес для промышленности в связи с благоприятным сочетанием свойств, которые позволяют применять такие марки стали в качестве конструкционных материалов для очень агрессивных сред. Равно как и нержавеющие стали других категорий, стали DSS подраз-

деляют на категории на основании показателя PRE_N (числовой эквивалент стойкости к питтинговой или точечной коррозии) – параметра, который зависит от объемного состава сплава, что позволяет провести ранжирование (хотя и качественное) по стойкости к точечной коррозии. По показателю PRE_N выделяют четыре категории стали DSS: экономно легированная, стандартная, супер- и гипердуплексная нержавеющая сталь. Экономно легированные стали DSS – это, главным образом, хромомарганцевые стали с низким содержанием никеля и молибдена, а к остальным категориям относятся марки нержавеющей стали на основе системы Cr-Ni-Mo, то есть с большим

содержанием легирующих элементов по сравнению с экономно легированными сталями DSS.

При производстве всех дуплексных нержавеющих сталей проводят термообработку на твердый раствор (нагрев, обеспечивающий получение твердого раствора) с последующей закалкой в воде. Термообработка данных марок стали необходима в основном для того, чтобы получить характерную дуплексную микроструктуру. Более того, она позволяет повторно растворить выделения фаз, которые могли образоваться на предыдущей стадии при горячей обработке. Температура термообработки на твердый раствор существенно зависит от химического состава, тем более что она определяет объемные доли феррита и аустенита. Эти стали склонны к выделению вторичных фаз (σ - и χ -фазы, нитриды) за весьма короткое [1–3] время изотермической обработки в интервале критических температур 600–1000°C и за время медленного охлаждения с температуры обработки на твердый раствор [4, 5]. Наличие таких фаз отрицательно сказывается на свойствах стали типа DSS, способствуя возникновению локализованной коррозии и вызывая явное снижение ударной вязкости [1].

Образование вторичных фаз в сталях DSS при непрерывном охлаждении и изотермической обработке широко изучено [1–6]. Результаты термодинамического моделирования, выполненного с учетом множества составляющих системы, показали, что σ -фаза (основное интерметаллическое соединение) – это не только аномалия структуры, возникающая в результате производственных ошибок, но также она встречается и в микроструктуре всех марок стали DSS в равновесном состоянии. σ -фаза, обогащенная хромом и молибденом, образуется из феррита в результате эвтектоидного распада из-за нестабильности ферритной основы под воздействием высоких температур, выделяется по границам зерна и в тройных стыках и растет вглубь феррита. Образование σ -фазы обычно сопровождается выделением ещё одного интерметаллического соединения, χ -фазы, которая присутствует в меньшем объеме, но содержит большое количество молибдена, при этом ее отрицательное влияние сопоставимо с влиянием σ -фазы [1–9]. Судя по результатам проведенных исследований, выделение двух интерметаллических

соединений происходит только в марках высоколегированной стали DSS в связи с высоким содержанием легирующих элементов, в то время как в экономно легированных марках стали DSS наблюдалось только образование нитридов [6]. В любом случае все марки стали DSS подвержены выделению нитридов, так как в них содержится значительное количество азота [6, 10]. Образование нитридов напрямую связано с изменением с температурой растворимости в феррите этого элемента, количество которого в феррите увеличивается при повышении температуры. Таким образом, феррит переходит в состояние пересыщенного твердого раствора. Это метастабильное состояние может привести к выделению нитридов либо во время закалки в воде, либо при изотермической обработке стали.

Для того чтобы проверить стабильность микроструктуры в течение относительно короткого времени обработки и в условиях, близких к равновесным, в данной работе проанализированы изменения в микроструктуре листа, изготовленного из двух марок экономно легированной дуплексной стали, происходящие в результате изотермической обработки в межкритическом интервале температур.

Материалы и методика проведения исследований

Из исследуемых марок экономно легированной стали LDX 2101 и LDX 2404, химический состав которых указан в табл. 1, на станах горячей и холодной прокатки были получены листы (толщиной 3 и 2 мм соответственно) с максимальным обжатием по толщине 50%. Холодная прокатка сопровождалась термообработкой (отжиг и закалка в воде), чтобы обеспечить возврат и рекристаллизацию деформированной микроструктуры.

Таблица 1

Химический состав исследуемых марок стали
[массовая доля, %]

Сталь	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S	N	Fe
2101	0,025	0,65	5,13	21,57	1,56	0,28	0,30	0,019	0,0010	0,229	сбаланс.
2404	0,022	0,33	2,83	24,41	3,34	1,54	0,42	0,021	0,0004	0,253	сбаланс.

Сталь прошла такую изотермическую обработку в интервале критических температур

(600–1000°C, продолжительность от 5 мин до 100 ч), чтобы можно было сопоставить полученные результаты на предмет подвижности атомов и механизмов диффузии, которые сильно зависят от температуры. Температуры старения выбирали по результатам анализа диаграмм фазового равновесия, полученных с помощью термодинамического моделирования, которые содержат информацию о микроструктуре в равновесном состоянии и, соответственно, о температурах, при которых возможно формирование определенных фаз. Моделирование фазового состава стали проводили с помощью программного обеспечения «Thermo-Calc» [11] на основе метода CALPHAD [12] с использованием базы термодинамических данных TCFE6.

Металлографическое исследование металла в состоянии поставки проводили с помощью оптического микроскопа (ОМ) «Leica DMRE» путем изучения образцов после травления реактивом Beraha. Этот реактив чаще других используется для травления образцов дуплексной нержавеющей стали, при этом феррит темнеет, а аустенит остается практически нетронутым. Исследование микроструктуры термообработанных материалов проводилось на нетравленных образцах с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) «Leica Cambridge Stereoscan 440», оборудованного энергодисперсионным спектрометром (EDS) «Falcon FEI». Исследование образцов в режиме использования сигналов от обратно рассеянных электронов (BSE) позволяет выделить различные структурные составляющие в зависимости от среднего атомного номера элементов. Аустенит светлее феррита из-за более высокого атомного номера, при этом вторичные фазы (такие как σ и χ) выглядят более яркими из-за более высокого содержания хрома и молибдена. Нитриды и карбиды наблюдаются в виде небольших темных частиц, форма и расположение которых зависит от процесса их выделения. Для оценки объемной доли фаз микрофотографии, полученные с помощью оптического микроскопа и сканирующего электронного микроскопа, обрабатывали в программной среде для компьютерного анализа изображений.

С целью идентификации вторичных фаз также был проведен рентгеноструктурный анализ (XRD) некоторых образцов с помощью дифрактометра Siemens D500 (CrK α -излучение, шаг 0,05°, время экспозиции 3 с) в интервале углов $2\theta = 55\text{--}145^\circ$.

Результаты и обсуждение

Микроструктура и диаграммы фазового равновесия

Микроструктура стали в состоянии поставки представлена на **рис. 1**, на котором легко можно заметить фрагментацию зерен в результате окончательной холодной прокатки. При сравнении условно одинаковых марок стали DSS, имеющих почти одинаковый химический состав, нельзя не учитывать роль микроструктуры, полученной после обработки металла давлением. Было показано, что прокатка может в некоторой степени повлиять на кинетику выделения вторичных фаз в исследуемых марках стали особенно на первых этапах процесса [13, 14]. Результаты анализа микрофотографий, полученных с помощью оптического микроскопа, подтверждают, что микроструктуры обеих марок стали были хорошо сбалансированы, при этом объемная доля фаз примерно одинаковая (примерно 52% феррита и 48% аустенита).

На диаграммах фазового равновесия (**рис. 2**) можно выделить области σ -фазы в обеих марках стали, при этом при повышении температуры область стабильности σ -фазы в стали марки 2404 немного шире, возможно, в связи с высоким содержанием легирующих элементов, которые способствуют её образованию (в частности хром и молибден). χ -фаза, наоборот, не наблюдается, в то время как она образуется в высоколегированных марках стали DSS [6], и это можно связать с более низким содержанием молибдена в этих марках стали по сравнению с другими. Помимо σ -фазы с помощью диаграмм равновесия можно также обнаружить значительное количество нитридов хрома (Cr $_2$ N), в обоих случаях примерно 2–4%, и очень малое количество карбидов M $_2$ 3C $_6$ (<1%).

Судя по обеим диаграммам, при 600°C образование σ -фазы завершается полностью, достигая примерно 30%. Однако если учесть кинетику, регламентирующую процессы диффузии, то окажется, что эта температура низкая, и время, необходимое для достижения равновесного состояния, может быть очень большим. При 800°C кинетика диффузии более благоприятная, и можно быстрее достичь состояния термодинамического равновесия. У стали марки 2404 эта температура находится в пределах области стабильности σ -фазы, а у стали 2101 – за пределами.

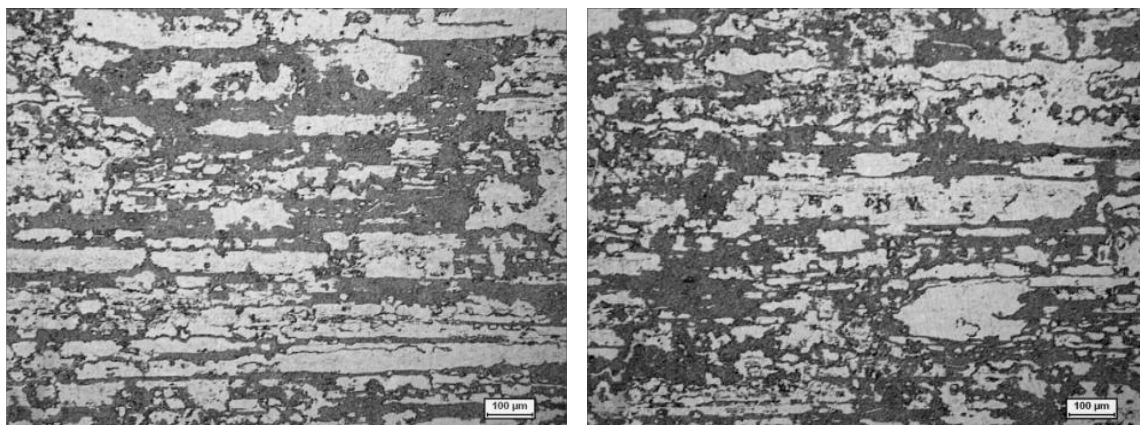


Рис. 1. Микроструктура образцов в состоянии поставки: LDX 2101 (слева) и LDX 2404 (справа)

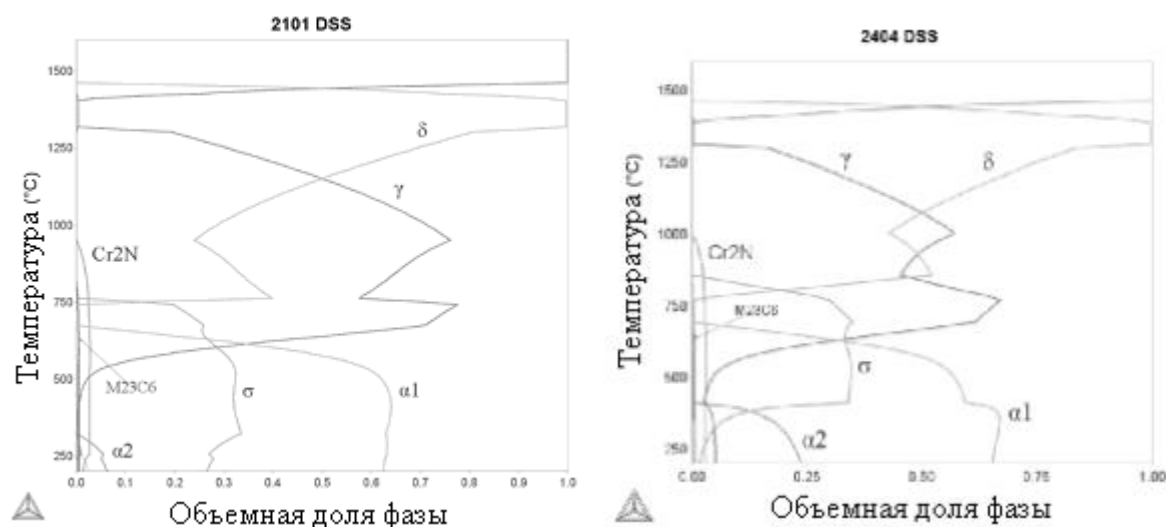


Рис. 2. Диаграммы фазового равновесия: LDX 2101 (слева) и LDX 2404 (справа)

Изотермическая обработка при 600°C

Как уже отмечалось, при 600°C в обеих марках стали расчеты показывают присутствие σ -фазы. Однако после термообработки при этой температуре в течение 100 ч были обнаружены только небольшие темные выделения фаз, расположенные в основном по границам зерен феррита, при этом их было больше в стали марки 2101, чем в стали марки 2404 (рис. 3). По результатам рентгеноструктурного исследования оказалось, что эти частицы являются нитридами хрома Cr_2N (гексагональная структура). Более того, даже если их размер был ниже предела обнаружения энергодисперсионным спектрометром, в прилегающей области было обнаружено повышенное количество хрома.

При сравнении дифракционных спектров стали марки LDX 2101 после отжига при 600°C и

в состоянии поставки (рис. 4) в первом случае можно заметить основной пик Cr_2N как раз перед пиком аустенита $\gamma(111)$ ($2\theta \approx 65,4^\circ$). Аналогичный результат был получен и в отношении LDX2404. Низкая объемная доля нитридов подтвердила только присутствие основного пика нитридов, положение которого позволяет причислить его к данному классу нитридов.

При 600°C диффузионная способность элементов, участвующих в образовании вторичных фаз, очень низкая, а термодинамические условия кажутся подходящими для выделения нитридов Cr_2N , так как хром – это также и основной легирующий элемент. Низкие коэффициенты диффузии вместе с низким содержанием элементов, которые содействуют образованию интерметаллических соединений (таких как молибден), не способствовали выделению χ - и σ -фаз, даже несмотря на то, что время выдержки играет важную роль, и термообработка на протяжении 100 ч может оказаться недостаточной для образования данных фаз.

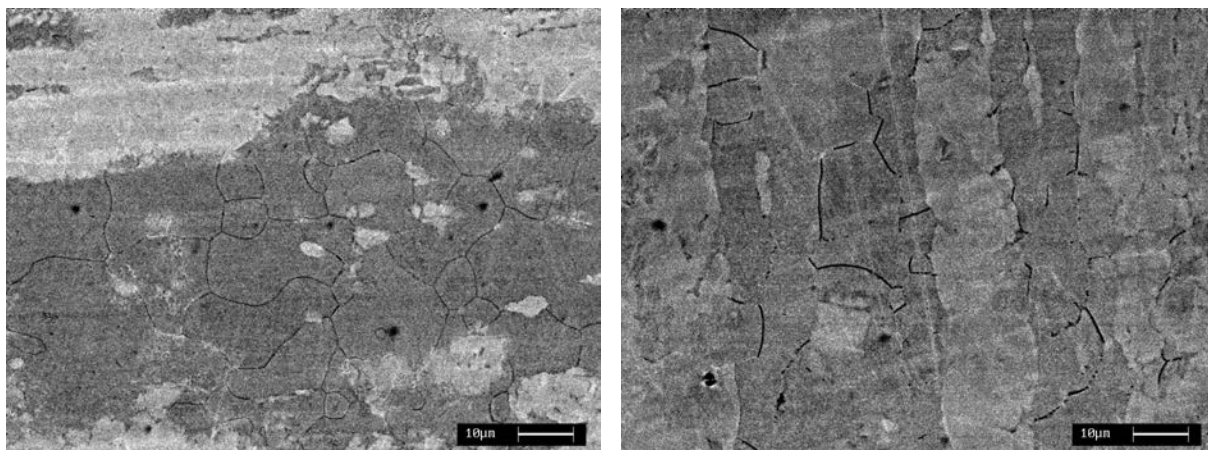


Рис. 3. Микроструктура после изотермической обработки при 600°C в течение 100 ч (SEM-BSE): LDX 2101 (слева) и LDX 2404 (справа)

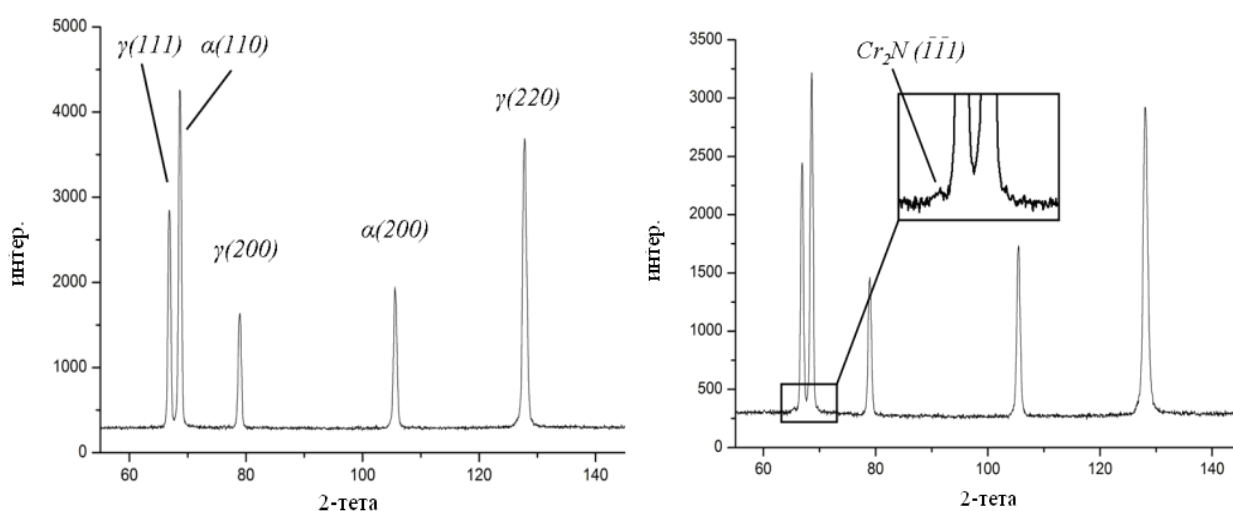


Рис. 4. Дифракционные спектры LDX 2101: в состоянии поставки (слева) и после термообработки при 600°C в течение 100 ч (справа)

LDX 2404: Изотермическая обработка при 800°C

Через 5 мин термообработки данной марки стали выделения фаз не отмечалось; через 10 мин были обнаружены такие же темные частицы, что и при 600°C, которые можно идентифицировать как нитриды хрома Cr_2N . Эти фазы в основном были расположены по границам зерен феррита и реже на межфазовой границе феррит/аустенит (рис. 5). С увеличением продолжительности термообработки (30 мин) отмечался умеренный рост объемных долей, но размер и количество частиц были все еще ниже пределов обнаружения с помо-

щью EDS и XRD.

При более длительной термообработке была получена совершенно иная микроструктура, а через час термообработки при 800°C отмечена новая фаза (светлые участки на рис. 6). Результаты анализа с помощью спектрометра EDS подтвердили наличие σ -фазы (табл. 2), в которой присутствовало значительно больше хрома и молибдена по сравнению с ферритом и аустенитом и состав которой соответствовал пределам содержания элементов в данном интерметаллическом соединении. Через 2 ч термообработки доля σ -фазы возросла, но этого было недостаточно для того, чтобы её можно было обнаружить с помощью XRD.

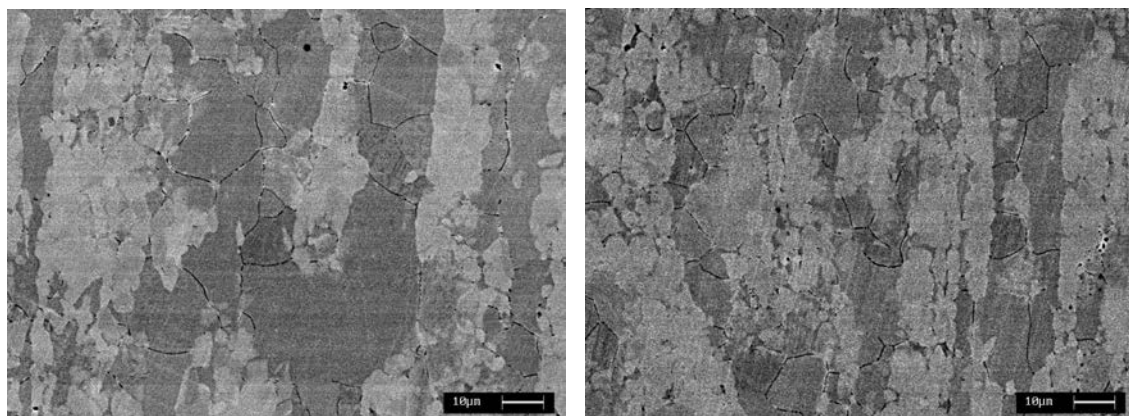


Рис. 5. Микроструктура LDX 2404 (SEM-BSE):
после термообработки при 800°C в течение 10 мин (слева) и 30 мин (справа)

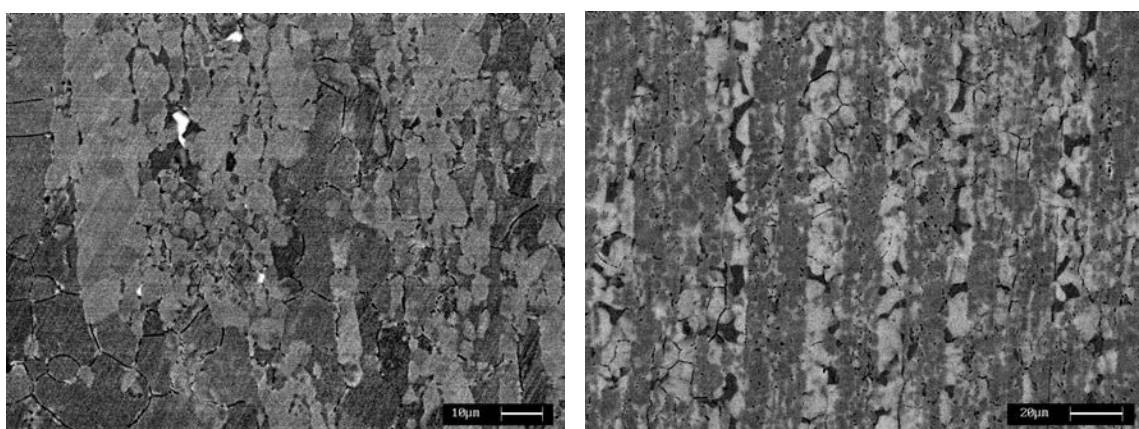


Рис. 6. Микроструктура LDX 2404 (SEM-BSE):
после обработки при 800°C в течение 1 ч (слева) и 50 ч (справа)

Таблица 2

Состав σ -фазы в LDX 2404 DSS (через 1 ч
термообработки при 800°C) [массовая доля, %]

Cr	Mo	Ni	Mn	Fe
30	3	2	3,5	сбаланс.

Было обнаружено, что с увеличением времени выдержки в микроструктуре постепенно росла и доля σ -фазы, приводя к почти полному распаду феррита через 50 ч обработки (см. рис. 6). Это подтверждает, что такое превращение происходит очень медленно по сравнению с высоколегированными сталями DSS. Опять же результаты исследования с помощью EDS и XRD (рис. 7) подтвердили, что обнаруженная фаза была интерметаллическим соединением. Более того, можно заметить, как в результате чересчур продолжительной термообработки происходило также и укрупнение частиц Cr_2N , которые в итоге не образовывали непрерывные цепочки по границам зерен, а становились менее связанными между собой из-за образования σ -фазы.

Весьма медленный распад феррита, наблюдае-

мый в LDX 2404, можно отнести на счет структурных факторов. При сравнении этой марки стали с высоколегированными марками стали DSS, у которых зарождение центров кристаллизации и рост σ -фазы происходит достаточно быстро [6, 15], низкое содержание легирующих элементов может вызвать задержку кинетики выделения фаз. На данный момент в стали марки 2404 содержание молибдена выше, чем у других экономно легированных марок стали, что можно считать отличительным фактором для образования σ -фазы, так как содержание молибдена регулирует процессы диффузии и кинетику выделения фаз, причастные к образованию интерметаллической фазы. У молибдена фактически самый высокий коэффициент диффузии при любой температуре в межкуритическом интервале температур [15], и его вклад имеет важное значение в увеличении движущей силы при образовании σ -фазы [7]. Как и предполагали, χ -фазу не обнаружили; в этом случае низкое содержание молибдена в стали было недостаточно для образования такого интерметаллического соединения, несмотря на то, что по сравнению с другими экономно легированными марками стали DSS оно было высоко.

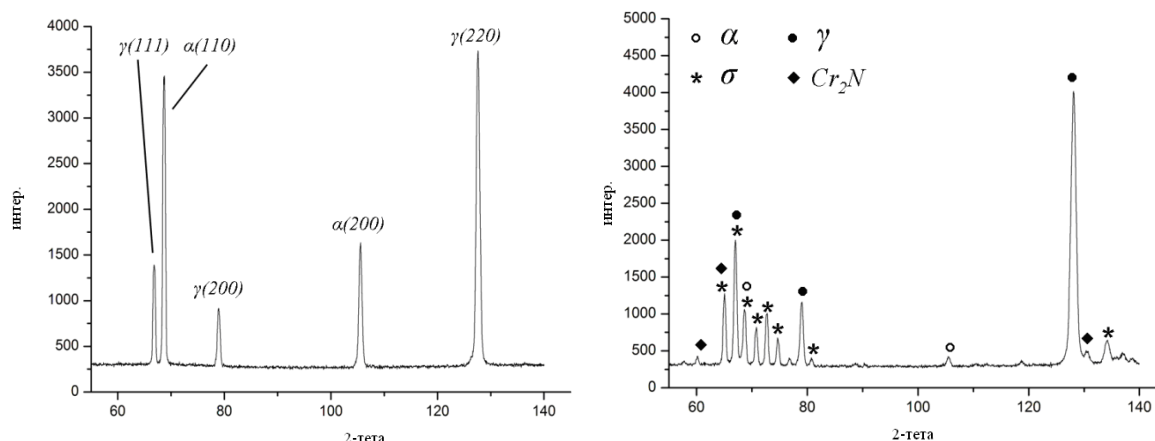


Рис. 7. Дифракционные спектры LDX 2404: в состоянии поставки (слева) и после термообработки при 800°C в течение 50 ч (справа)

LDX 2101: Изотермическая обработка при 800°C

Через 10 мин термообработки данной марки стали при 800°C обнаружили выделение только нитридов хрома.

Из-за меньшего содержания хрома частицы нитридов были немного меньше тех, которые присутствовали в марке стали 2404, но их объемные доли сопоставимы. При увеличении продолжительности термообработки число выделений выросло, и выделившиеся фазы укрупнились, но остались ниже пределов обнаружения. Через 2 ч обработки нитриды были опять единственным видом выделений, сохранив примерно такие же размеры, что и при кратковременной обработке, но их объемная доля увеличилась.

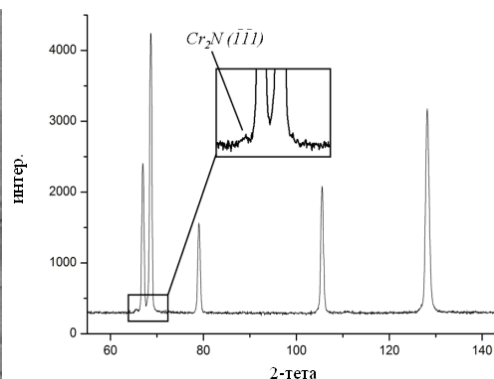
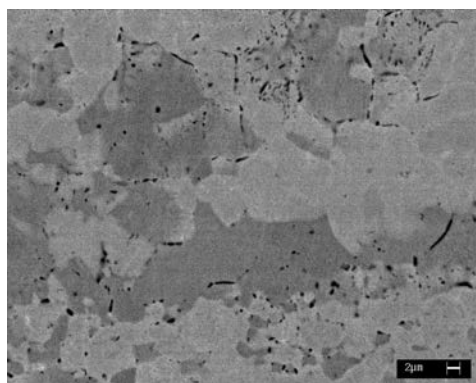


Рис. 8. LDX 2101 после обработки при 800°C в течение 50 ч: микроструктура SEM-BSE (слева) и соответствующий дифракционный спектр (справа)

Как и ожидалось, через 50 ч термообработки по результатам измерений с помощью SEM и XRD выяснилось, что никаких интерметаллических соединений не обнаруживается, а структура состоит преимущественно из феррита и аустенита (рис. 8). В результате продолжительной термообработки данной марки стали возросла объемная доля Cr_2N , что позволило выявить нитриды с помощью XRD (см. рис. 8). Также по пово-

ду этой марки стали можно отметить, что через 50 ч обработки произошло укрупнение нитридов, а выделения фаз по границам зерен стали более разрозненными по сравнению с кратковременной термообработкой.

Кинетика выделения вторичных фаз

Как уже отмечалось, только в стали марки LDX 2404 наблюдалось выделение σ -фазы. На рис. 9 представлены кривые зависимости расчетной объемной доли интерметаллического соединения от продолжительности термообработки. Из-за более низкого содержания легирующих элементов кинетика выделения σ -фазы в стали марки 2404 была очень медленной по сравнению с марками стали DSS с более высоким содержанием легирующих элементов, и через 50 ч (3000 мин) термообработки равновесное состояние не было полностью достигнуто, так как превращение феррита не завершилось.

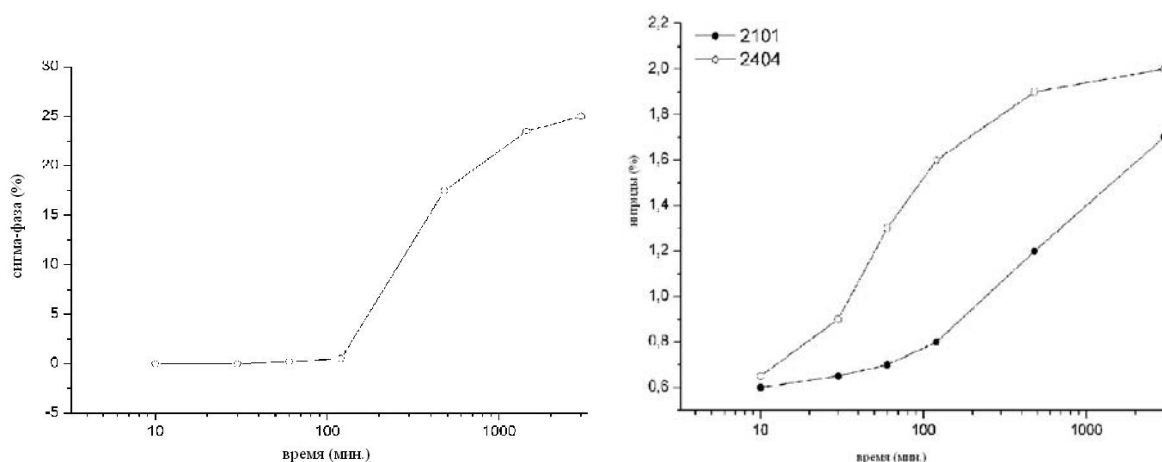


Рис. 9. Кинетика выделения вторичных фаз при 800°C:
σ-фаза в LDX 2404 (слева) и Cr₂N в обеих марках стали (справа)

При всех температурах и периодах выдержки нитриды хрома Cr₂N наблюдались в обеих марках стали; кинетика выделения нитридов хрома представлена на рис. 9. При непродолжительной термообработке (10 мин) количество выделений фаз в сталях было сопоставимо, хотя при увеличении длительности термообработки более высокое содержание хрома в стали марки 2404 влияет на количество выделяющихся фаз и приводит к увеличению объемной доли нитридов. Однако через 50 ч термообработки количество выделений вторичных фаз становится примерно одинаковым. Это явление можно объяснить, принимая во внимание тот факт, что в стали марки 2404 на первоначальных этапах распад феррита происходит очень медленно, и термообработка приводит в основном к выделению нитридов; с последующим появлением σ-фазы кинетика выделения вторичных фаз изменяется и, как следствие, образование нитридов уменьшается. Интерметаллическое соединение, которое выделяется при более продолжительном времени выдержки, обеднило хромом матрицу, сдерживая выделение большего количества нитридов.

Результаты изотермической обработки в течение 10 мин во всем интервале критических температур с целью определения температуры, способствующей образованию нитридов, подтвердили, что пики выделения фаз находились в интервале 800–850°C для LDX 2404 и 750–850°C для LDX 2101 (рис. 10).

Кинетика выделения нитридов в дуплексной нержавеющей стали марки SAF 2101 (пруток диаметров 30 мм с таким же химическим составом, но с 0,07% Mo) описана в предыдущей работе [6]. При сравнении этих двух экономно ле-

гированных марок стали DSS можно заметить ускорение выделения фаз в рассматриваемой в данной работе стали марки LDX по отношению к марке SAF, хотя расчетный интервал критических температур (750–850°C) одинаковый. Этот факт можно объяснить, если учесть влияние как разного состава, так и разной микроструктуры. Помимо более высокого содержания молибдена, который может способствовать выделению фаз, в LDX 2101 микроструктура была достаточно фрагментированной из-за окончательной холодной прокатки. Таким образом, повышенное количество тройных стыков и границ зерен и напряжения, вызванные деформацией, могут действовать в качестве фактора, ускоряющего кинетику выделения фаз, смещая выделение нитридов в сторону более коротких длительностей термообработки.

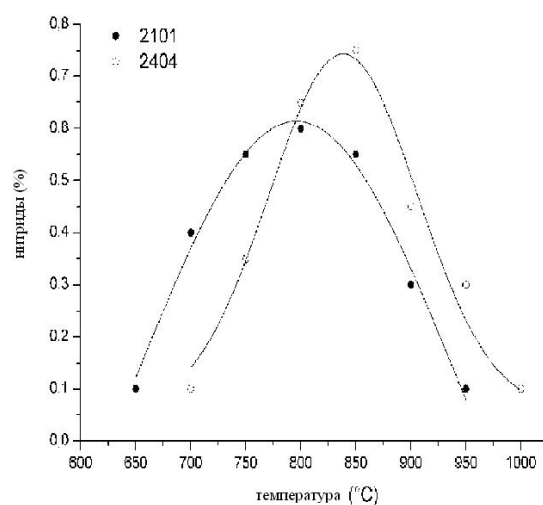


Рис. 10. Псевдокинетика выделения вторичных фаз в LDX 2101 и LDX 2404

Заключение

В настоящей работе рассмотрено выделение вторичных фаз после изотермической обработки листов, изготовленных из экономно легированной дуплексной стали двух марок LDX 2101 и LDX 2404. При всех температурах в интервале критических температур (600–1000°C) и при любой продолжительности термообработки (от 10 мин до 100 ч) по границам зерен были обнаружены нитриды (Cr_2N), хотя выделение фаз проходило с разной кинетикой в зависимости от рассматриваемой марки стали. Такие частицы могут ограничивать благоприятные характеристики дуплексных нержавеющих сталей, ставя под угрозу оптимальное сочетание коррозионной стойкости и механической прочности, получаемое благодаря двухфазной микроструктуре. Фактически из-за нитридов количество хрома по границам зерен уменьшается и, таким образом, создаются благоприятные условия для локализованного коррозионного воздействия и охрупчивания стали за счет облегчения механизмов разрушения. Обнаружено, что в дуплексной нержавеющей стали марки 2404 выделение нитридов происходило при 800°C (по сравнению со сталью марки 2101) из-за более высокого содержания хрома, даже если через 50 ч термообработки в обеих марках стали были обнаружены сопоставимые объемные доли выделений. Более высокое содержание хрома в стали марки 2404 ускоряет кинетику выделения фаз на (относительно) ранних этапах процесса.

В противоположность тому, что происходит в других типах экономно легированной дуплексной нержавеющей стали, в стали марки 2404 изотермическая обработка при 800°C вызывает образование σ -фазы через час термообработки при постоянной температуре. Эта фаза представляет собой очень вредное интерметаллическое соединение, и ее выделение характерно для марок дуплексной нержавеющей стали с более высоким содержанием легирующих элементов, таких как SAF 2205 и 2507, в течение нескольких минут термообработки. Образование σ -фазы в стали марки 2404 можно объяснить более высоким содержанием молибдена по сравнению с другими экономно легированными

сталями DSS. Молибден, равно как и хром, – один из основных составляющих интерметаллической фазы, и его содержание в стали марки 2404 в 5–10 раз выше, чем это обычно принято в экономно легированных сталях DSS, то есть сталь более склонна к выделению σ -фазы. Следовательно, количество молибдена в изучаемых марках стали можно считать решающим фактором для возникновения σ -фазы, формирование которой было, во всяком случае, медленнее, чем в более легированных DSS сталях, в высшей степени способствующим увеличению движущей силы образования интерметаллических фаз, контролируя диффузионную кинетику.

Сравнение с результатом такой же изотермической обработки прутка из SAF 2101, одинакового по химическому составу, но с меньшим количеством молибдена и менее фрагментированной микроструктурой, подтверждает роль характерных особенностей микроструктуры в кинетике выделения вторичных фаз.

Список литературы

1. Nilsson J. O. Mater Sci Tech Ser 8 (1992) 685.
2. Gunn R. N. Duplex Stainless Steels: Microstructure, Properties and Applications. Abington Publishing, Cambridge, England (1997).
3. Calliari I., Pellizzari M., Ramous E. Mat Sci Tech Ser 27 (2011) 928.
4. Calliari I., Zanesco M., Ramous E. and Bassani P. J Mater Eng Perform 16 (2007) 109.
5. Calliari I., Bassani P., Brunelli K., Breda M. and Ramous E. J Mater Eng Perform 22 (2013) 3860.
6. Calliari I., Pellizzari M., Zanellato M., Ramous E. J Mater Sci 46 (2011) 6916.
7. Wessman S., Petterson R. and Hertzman S. Steel Res Int 81 (2010) 337.
8. Pohl M., Storz O., Glogowski T. Mater Charact 58 (2007) 65.
9. Nilsson J.O., Kangas P., Karlsson T. and Wilson A. Metall Mater Trans A 31A (2000) 35.
10. Knyazeva M., Pohl M. Metall Microstr Anal 2 (2013) 343.
11. Sundman B., Jansson B. and Anderson J.O. CALPHAD 9 (1985).
12. Kaufman L. and Bernstein H. Computer calculation of phase diagrams. Man. Labs. Inc. Cambridge, Mass/Academic Press, New York (1970).
13. Calliari I., Breda M., Miranda Pérez A.F., Ramous E., Bertelli R. Proc. Conf. International Conference & Exhibition on Analysis & Testing of Metallurgical Processes & Materials. The Chinese Society for Metals, Beijing (RC), 2012.
14. Cho H.S., Lee K. Mater Charact 75 (2013) 29.
15. Duprez L., De Cooman B.C. and Akdut N. Steel Res 72 (2001) 311.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ISOTHERMAL AGEING IN LEAN DUPLEX STAINLESS STEELS

Calliari Irene – Researcher DII, University of Padova, Padova, Italy. E-mail: irene.calliari@unipd.it.

Breda Marco – Ph.D. student, Industrial Engineering Department (DII), University of Padova, Padova, Italy. E-mail: marco.breda@studenti.unipd.it.

Frigo Marco – Customer Service Manager, Outokumpu S.p.A., Genova, Italy.

Massimo Pellizzari – Associate Professor Industrial Engineering Department (DII), University of Trento, Trento, Italy.

Emilio Ramous – Full Professor DII, University of Padova, Padova, Italy.

Abstract. The favourable combination of mechanical properties and corrosion resistance in Duplex Stainless Steels (DSS) is due to their biphasic microstructure, consisting of almost equal volume fractions of ferrite and austenite. However, all types of DSS are subject to secondary phases precipitation phenomena, especially in the temperature range 600–1000°C, which can occur even for very short soaking times, compromising the interesting properties of these steels.

The main secondary phase observed in DSS is the intermetallic σ -phase, which forms from ferrite via eutectoid decomposition at high temperatures, and is generally accompanied by the formation of another intermetallic, the χ -phase. The precipitation of these phases is mainly observed in the high-alloyed DSS grades, while in the lower-alloyed Lean DSS it has not been reported, probably owing to reduced levels of chromium and molybdenum. On the contrary, in all DSS grades nitrides precipitation is usually observed.

In this work, the precipitation kinetics of secondary phases in two Lean DSS are examined, after isothermally treating the materials within the critical temperature ranges. In grade LDX 2101, only nitrides were detected, whereas a significant precipitation of σ -phase was observed in LDX 2404 for soaking times longer than 1 hour.

Keywords: lean duplex stainless steels, isothermal heat treatments, σ phase, chromium nitride, precipitation kinetics.

References

1. Nilsson J. O. Mater Sci Tech Ser 8 (1992) 685.
2. Gunn R. N. Duplex Stainless Steels: Microstructure, Properties and Applications. Abington Publishing, Cambridge, England (1997).
3. Calliari I., Pellizzari M., Ramous E. Mat Sci Tech Ser 27 (2011) 928.
4. Calliari I., Zanesco M., Ramous E. and Bassani P. J Mater Eng Perform 16 (2007) 109.
5. Calliari I., Bassani P., Brunelli K., Breda M. and Ramous E. J Mater Eng Perform 22 (2013) 3860.
6. Calliari I., Pellizzari M., Zanellato M., Ramous E. J Mater Sci 46 (2011) 6916.
7. Wessman S., Petterson R. and Hertzman S. Steel Res Int 81 (2010) 337.
8. Pohl M., Storz O., Glogowski T. Mater Charact 58 (2007) 65.
9. Nilsson J.O., Kangas P., Karlsson T. and Wilson A. Metall Mater Trans A 31A (2000) 35.
10. Knyazeva M., Pohl M. Metall Microstr Anal 2 (2013) 343.
11. Sundman B., Jansson B. and Anderson J.O. CALPHAD 9 (1985).
12. Kaufman L. and Bernstein H. Computer calculation of phase diagrams. Man. Labs. Inc. Cambridge, Mass/Academic Press, New York (1970).
13. Calliari I., Breda M., Miranda Pérez A.F., Ramous E., Bertelli R. Proc. Conf. International Conference & Exhibition on Analysis & Testing of Metallurgical Processes & Materials. The Chinese Society for Metals, Beijing (RC), 2012.
14. Cho H.S., Lee K. Mater Charact 75 (2013) 29.
15. Duprez L., De Cooman B.C. and Akdut N. Steel Res 72 (2001) 311.

УДК 621.81

УДАРНО-ФРИКЦИОННАЯ КОМБИНИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА ГИБКИМ ИНСТРУМЕНТОМ

Белевский Л.С., Белевская И.В., Ефимова Ю.Ю., Копцева Н.В.

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

Аннотация. Исследована возможность использования секционной дисковой вращающейся проволочной щетки для наноструктурирования поверхностного слоя металлических изделий с последующим нанесением функциональных покрытий сплошной проволочной щеткой. Установлено, что методом ударно-фрикционной обработки возможно получение твердого наноструктурированного поверхностного слоя с размером фрагментов до 0,13 мкм подобно тому, как это достигается при интенсивной пластической деформации.

Ключевые слова: поверхностное упрочнение, наноструктурирование, фрикционное плакирование, гибкий инструмент.

Введение

Гибкий инструмент – вращающиеся проволочные щетки (ВПЩ) применяются для очистно-упрочняющей обработки в различных обла-

стях техники [1], в том числе для нанесения покрытий [2]. В работе [3] рассмотрена фрикционная наноструктурирующая обработка металлических поверхностей сплошной ВПЩ. Известно, что при применении секционных

дисковых щеток поверхность упрочняется наиболее эффективно. Для этой цели используются также щетки с ударными элементами, которые сложны по конструкции в изготовлении и недолговечны в эксплуатации [1].

По нашему мнению, для упрочнения и наноструктурирования поверхностного слоя целесообразно использовать секционные щетки, изготовленные из стальной закаленной проволоки, сплетенной в пучки. При входе в контакт такого пучка с поверхностью изделия он оказывает не только фрикционное воздействие, но и ударное, подобно струе дробы из дробеметной установки или при упрочнении чеканкой.

Следует отметить, что обычно скорость струи дробы составляет 60–70 м/с [4]. Таких скоростей легко достигнуть и для ВПЩ.

Цель настоящей работы – изучение возможности наноструктурирования стальной поверхности при обработке секционной ВПЩ и последующего нанесения на эту поверхность функциональных покрытий сплошной ВПЩ.

Материалы и методика эксперимента

Обработка образцов проводилась в два этапа.

Вначале поверхность образцов упрочняли секционной ВПЩ, а затем ее заменяли на сплошную, которой наносили покрытие.

Цилиндрические образцы, изготовленные из стали 20, диаметром 12 мм обрабатывали на токарном станке, на суппорт которого устанавливалась специальная приставка [5]. Диаметр секционной ВПЩ – 200 мм, скорость вращения 6 000 об/мин, диаметр стальной проволоки ворса – 0,5 мм, длина пучка 40 мм, расстояние между пучками 10 мм, натяг (величина подачи ВПЩ на образец) 3–4 мм. Материал для нанесения покрытия изготавливали в виде прутка диаметром 20 мм, который прижимался к сплошной ВПЩ (диаметр 175 мм, диаметр гофрированной стальной проволоки 0,25 мм) с усилием 20–40 Н. Натяг – 2–3 мм, число проходов ВПЩ по обрабатываемой поверхности 4. В качестве материала покрытия была использована латунь Л-63.

Анализ микроструктуры выполнялся с помощью металлографического микроскопа Meiji Techno с применением системы компьютерного анализа изображений Thixomet Pro [6]. Растровый электронно-микроскопический (РЭМ) анализ осуществлялся с помощью микроскопа

JSM-6490LV при ускоряющем напряжении 30 кВ в режиме вторичных электронов. Микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) проводился с использованием приставки Oxford. Твердость измерялась методом вдавливания алмазной пирамиды в соответствии с ГОСТ 9450-76 на твердомере Buehler Micromet.

Результаты и их обсуждение

Исследование микроструктуры методами оптической микроскопии показало, что во всех случаях на поверхности образуется деформированный слой (рис. 1). В образце, подвергнутого обработке, секционной ВПЩ на поверхности обнаружен слой, имеющий повышенную травимость толщиной порядка 50 мкм (рис. 1, а). В образце, подвергнутого комбинированной обработке (деформационной + нанесение покрытия), на поверхности были выявлены два слоя: первый слой – латунное покрытие толщиной до 10 мкм и второй – слой сильнодеформированной структуры толщиной порядка 30 мкм (рис. 1, б).

РЭМ показал, что в обоих случаях в микроструктуре поверхностного слоя происходит формирование деформационных полос, состоящих из вытянутых зерен феррита, которые ориентированы перпендикулярно оси образца (рис. 2, а, в). Кроме того, происходит вытягивание перлитных участков и деформация и дробление цементитных пластин в них (рис. 2, б, г).

В образце, подвергнутом ударно-деформационной обработке секционной ВПЩ, имеется слой с повышенной травимостью, который методами оптической микроскопии невозможно разрешить (см. рис. 1, а). Методом РЭМ лишь в отдельных участках различаются волокна толщиной порядка 0,15 мкм, что свидетельствует о большой деформации (рис. 2, а). Такой слой можно условно отнести к аморфизированному слою [3].

В образце, подвергнутом комбинированной обработке ударно-фрикционной секционной и сплошной ВПЩ с нанесением латунного покрытия, имеется подслоя, состоящий из смеси стали и латуни (рис. 2, в).

Исследование распределения элементов по линии методом МРСА подтверждается перекрытием линий, что, очевидно, связано с перемешиванием материалов при нанесении покрытия (рис. 3).

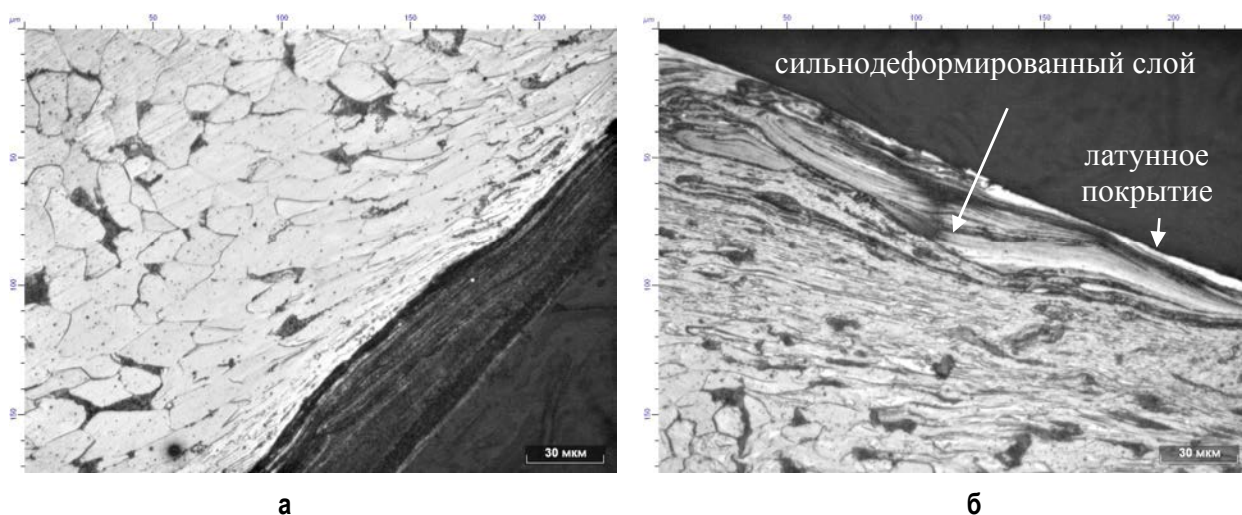


Рис. 1. Общий вид микроструктуры поверхностного слоя прутка стали марки 20:
а – ударно-деформационная; б – комбинированная обработка щетками, х 500

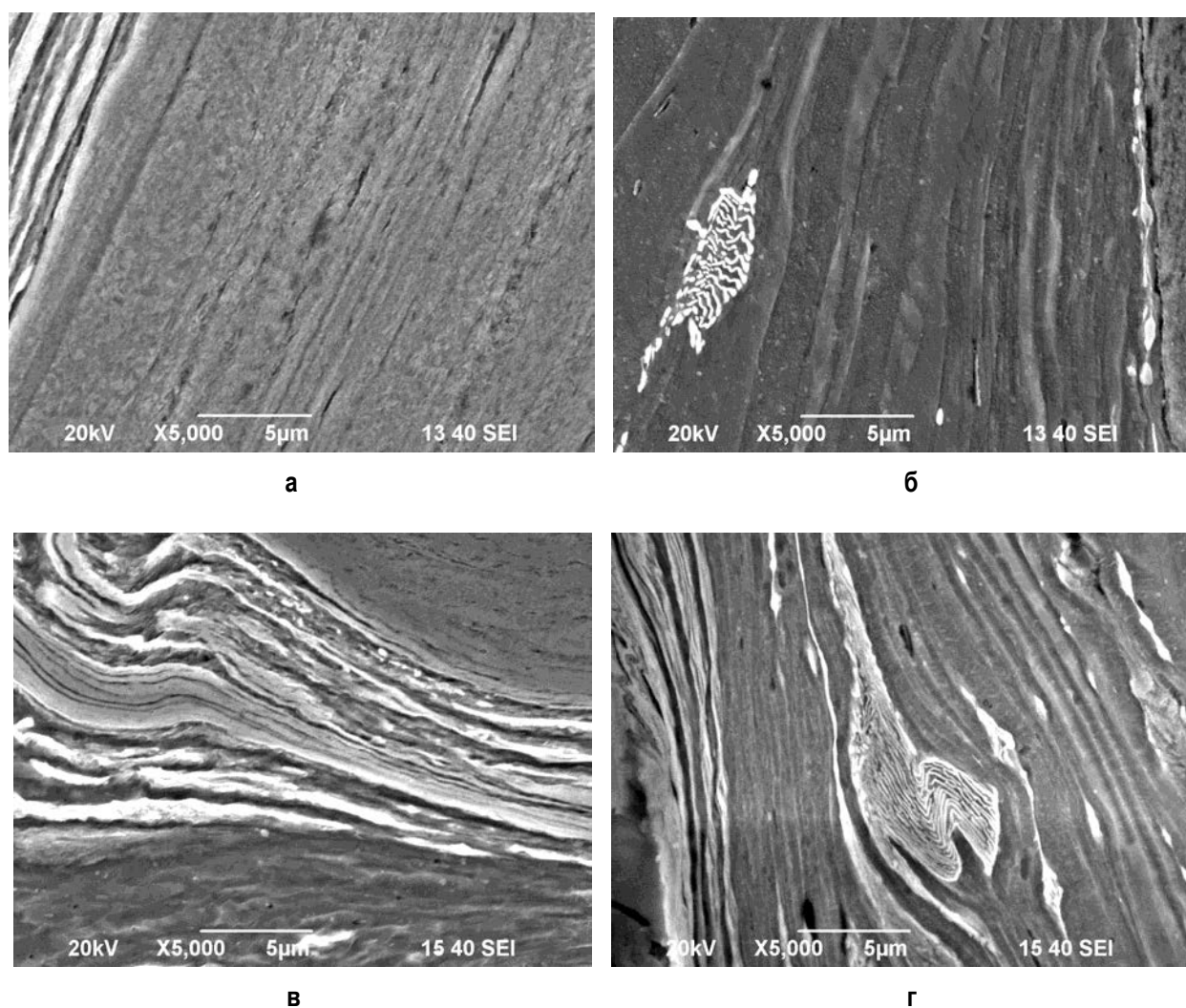
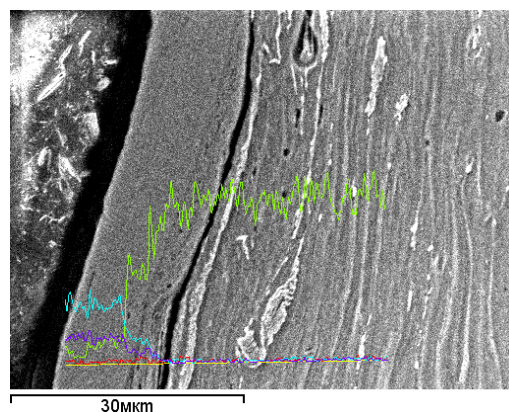
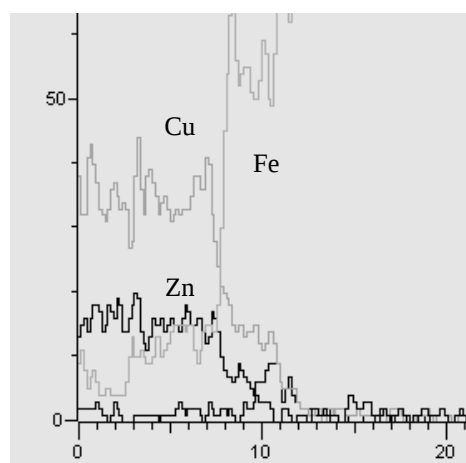


Рис. 2. Особенности строения поверхностного слоя прутка стали 20:
а, б – ударно-деформационная обработка; в, г – комбинированная обработка



а



б

Рис. 3. МРСА распределением элементов по линии: а – электронное изображение микроструктуры с наложенными линиями распределения элементов; б – график распределения элементов по линии

В основном материале в поверхностном слое помимо образования в микроструктуре деформационных полос развиваются процессы фрагментации в них с образованием фрагментов размером до 0,13 мкм (рис. 4). Аналогичный размер фрагментов возможно получить различными методами интенсивной пластической деформации (ИПД), в частности равноканальным угловым прессованием (РКУП) на таком же классе сталей [6, 7].

Сопоставление микротвердости (рис. 5), измеренной в различных участках, показало, что максимальная твердость в образце без покрытия наблюдалось в аморфизированном слое и составило 5886 МПа, что более чем в 3 раза превышает твердость в центральной области образца. Наибольшее значение микротвердости в образце с покрытием зафиксировано в слое, состоящем из смеси стали и латуни, который имеет сильно деформированную структуру (она в 2 раза превышает твердость центральной области) (см. рис. 2, в, г и рис. 4).

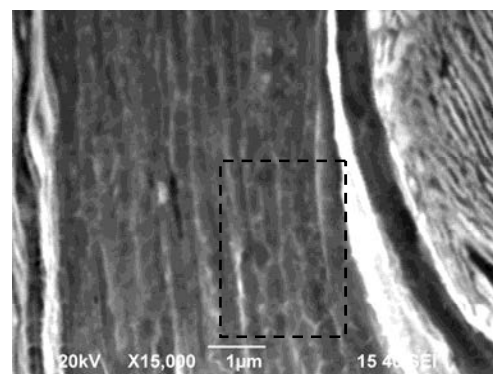


Рис. 4. Образование фрагментов в деформационных полосах

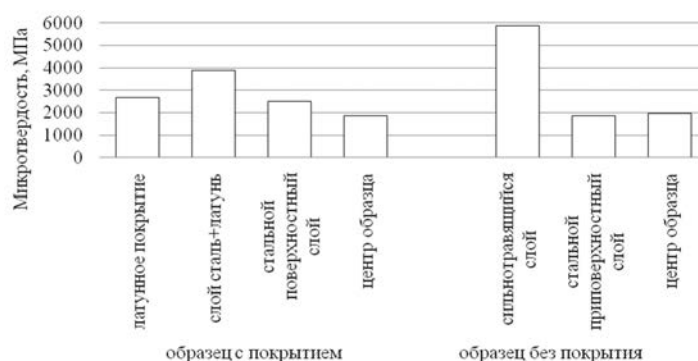


Рис. 5. Сопоставление микротвердости прутков из стали 20 после различных обработок

Заключение

Результаты исследования показали, что методом ударно-фрикционной обработки гибким инструментом возможно получение твердого наноструктурированного поверхностного слоя с размером фрагментов до 0,13 мкм подобно тому, как это достигается при ИПД.

Ударно-фрикционная обработка секционными ВПЩ может быть использована для упрочнения деталей и инструмента. Нанесение функциональных покрытий может дополнительно повысить износостойкость и другие служебные характеристики. Этот метод высокопроизводителен, экологически чист, не требует дорогостоящего оборудования и может быть реализован на обычных металлообрабатывающих станках.

Список литературы

1. Перепичка Е.В. Очистно-упрочняющая обработка изделий щетками. М.: Машиностроение, 1989.
2. А.с. 57162 СССР. Способ нанесения металлических покрытий / А.А. Абиндер // Б.И. 1940. №6.
3. Белевский Л.С., Белевская И.В., Ефимова Ю.Ю. Фрикционная наноструктурирующая обработка металлических поверхностей и нанесение фрикционных покрытий гибким инструментом // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональ-

- ные покрытия, 2014. № 1. С. 70-76.
4. Полевой С.Н., Евдокимов В.Д. Упрочнение металлов: Справочник. М.: Машиностроение, 1986.
 5. Белевский Л.С. Пластическое деформирование поверхностного слоя и формирование покрытия при нанесении гибким инструментом. - Магнитогорск: Лицей РАН, 1996.
 6. Koptseva N.V., Chukin M.V., Nikitenko O.A. Use of the Thixomet PRO software for quantitative analysis of the ultrafine-grain struc-

- ture of low-and medium-carbon steels subjected to equal channel angular pressing. // Metal Science and Heat Treatment. 2012. Т. 54. № 7-8. С. 387-392.
7. Формирование структуры и механических свойств углеродистой конструкционной стали в процессе наноструктурирования методом равноканального углового прессования / Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Барышников М.П., Никитенко О.А. // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 7. С. 11-17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

IMPACT FRICTION COMBINED PROCESSING BY FLEXIBLE TOOLS

Belevskiy Leonid Sergeevich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 (3519) 09 76 79. E-mail: l.belevskiy@mail.ru.

Belevskaya Irina Valeryevna – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 (3519) 23 06 82. E-mail: belirena@yandex.ru.

Efimova Yuliya Yurevna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 (3519) 29 84 81. E-mail: jefimova78@mail.ru.

Koptseva Nataliya Vasilevna – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 (3519) 29 85 67. E-mail: kopceva1948@mail.ru.

Abstract. This article investigates a possible use of a section rotary wire wheel brush for nanostructure formation of a metalware surface layer with further application of functional coatings by a solid wire brush. It is established that the impact friction processing technique may be used to get a hard nanostructured surface layer containing fragments of 0.13 μm or less, just as it is achieved by intensive plastic deformation.

Keywords: surface hardening, nanostructure formation, friction plating, flexible tool.

References

1. Perepichka E.V. *Ochistno-uprochnyayushchaya obrabotka izdeliy shchetkami* [Cleaning and hardening processing of products by brushes]. Moscow: Mashinostroenie, 1989.
2. Abinder A.A. Metal coating application technique. Author's certificate USSR, no. 57162, 1940.

3. Belevskiy L.S., Belevskaya I.V., Efimova Yu.Yu. *Friktsionnaya nanostukturiruyushchaya obrabotka metallicheskih poverkhnostey i nanosenie friktsionnykh pokrytiy gibkim instrumentom* [Friction nanostructuring of metal surfaces and application of friction coatings by flexible tools]. *News of higher educational institutions. Powder metallurgy and functional coatings*, 2014, no. 1, pp. 70-76.
4. Polevoy S.N., Evdokimov V.D. *Uprochnenie metallov* [Metal hardening]: Handbook. Moscow: Mashinostroenie, 1986.
5. Belevskiy L.S. Plastic deformation of a surface layer and coating formation by flexible tools. Magnitogorsk: Lyceum of the Russian Academy of Sciences, 1996.
6. Koptseva N.V., Chukin M.V., Nikitenko O.A. Use of the Thixomet PRO software for quantitative analysis of the ultrafine-grain structure of low-and medium-carbon steels subjected to equal channel angular pressing. *Metal Science and Heat Treatment*, 2012, vol. 54, no. 7-8, pp. 387-392.
7. Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Baryshnikov M.P., Nikitenko O.A. Formation of the structure and mechanical properties of carbon structural steel during nanostructuring by equal channel angular pressing. *Material deformation and destruction*, 2011, no. 7, pp. 11-17.

УДК 621.762

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА РАЗМОЛЬНЫХ СРЕД ПРИ МЕХАНОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ШИХТЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГОРЯЧЕДЕФОРМИРОВАННОГО ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА СИСТЕМЫ AL-SI-C

Дюжечкин М.К., Сергеев С.Н.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

Аннотация. В работе исследовано влияние состава жидких размольных сред и приведенной энергии горячей штамповки порошковых заготовок на формирование структуры и свойств горячедеформированных материалов системы Al-Si-C на основе механохимически активированных шихт. Установлено формирование в процессе механохимической активации шихты алюминий-кремний-графит твердого раствора Al_3Si в неравновесном

состоянии. Предложена энергоэффективная технология получения горячедеформированного порошкового материала Al-Si-C с повышенными значениями предела прочности на срез 192 МПа и твердости 262 HV при пониженном значении приведенной работы горячей штамповки.

Ключевые слова: механохимическая активация, горячедеформированный порошковый материал, алюминий, кремний, графит, структура, агломерат.

Введение

Сплав Al-Si характеризуется износостойкостью и комплексом удельных механических свойств, необходимых для изготовления деталей автомобильной, авиационной и космической техники [1]. Технологии порошковой металлургии позволяют получать материалы системы Al-Si с повышенными эксплуатационными свойствами за счет равномерно распределенных частиц Si и дисперсных включений в матрице на основе алюминия, препятствующих движению дислокаций [2]. Механическое легирование кремнием алюминия обеспечивает формирование мелкодисперсной структуры, наследуемой консолидированным материалом [3]. Использование жидкой размольной среды этанола в процессе механического легирования шихты алюминий-кремний устраняет налипание Al к стенкам кюветы [4]. Перспективным способом приготовления шихты, обеспечивающим неокисляемость Al и активированное спекание порошка в атмосфере воздуха, является гидрохимическое легирование в среде насыщенного раствора борной кислоты [5,6]. При использовании механохимически активированных в насыщенном водном растворе борной кислоты шихт Д16-ферротитан [7] интенсифицируются процессы уплотнения горячей штамповки и формируется мелкодисперсная структура горячедеформированного порошкового материала (ГДПМ). Введение графита при механохимической активации стружки сплава Д16 [8] приводит к синтезу упрочняющей фазы Al_4C_3 .

Цель работы – установить закономерности влияния состава жидких размольных сред механохимической активации на формирование структуры и свойств ГДПМ системы Al-Si-C, разработать усовершенствованную энергоэффективную технологию его получения.

Методика проведения эксперимента

На основании предварительно проведенных исследований [9] горячей штамповки (ГШ) стружкового порошка сплава АЛ30 была предложена технология изготовления образцов, включающая приготовление шихты, холодное прессование (ХП) давлением 310 МПа и ГШ при температуре нагрева 650°C в течение 0,12 кс и приведенной работе ГШ, равной 1–70 МДж/м³. В качестве исходных материалов для приготовления шихты алюминий-кремний-графит исполь-

зовали порошки алюминия ПА-4, кремния Кр00 (17,5% мас.) фракции менее 63 мкм и графит ГК-3 (2,7% мас.). Активирование шихт проводили в шаровой планетарной мельнице САНД-1 при частоте вращения ротора 290 мин⁻¹, соотношении масс шаров (диаметр шаров 10 мм) и шихты 10:1. Для получения шихты алюминий-кремний-графит использовали механическую обработку в жидких средах (табл. 1) НВРБК (Т1) и спирта (Т2), способствующих смещению динамического равновесия конкурирующих процессов диспергирования-агломерации в сторону разрушения исходных частиц алюминия, кремния, графита и агломератов на их основе за счет эффекта абсорбционного понижения прочности (эффект Ребиндера) [10,11].

Таблица 1

План проведения эксперимента при исследовании МХА шихт алюминий-кремний и алюминий-кремний-графит

Состав размольной среды, % мас.	Варианты технологий	
	Т1	Т2
H ₃ BO ₃	5,5	–
H ₂ O	14,5	–
C ₂ H ₅ OH	–	20

Для оценки степени агломерирования частиц шихты в процессе МХА определяли коэффициент ($КАГ_{0,1} = d_{0,1} / d_n$) и показатель агломерации ($ПАГ = d_0 / d_1$) с учетом среднего размера частиц исходной d_n , активированной d_0 и прошедшей растирование пестиком в ступке d_1 шихты.

Процессы уплотнения и деформации при ХП и ГШ порошковой заготовки оценивали значениями высотной деформации ϵ_h относительных плотностей $\theta_{хп}$, $\theta_{гш}$ горячедеформированного порошкового материала

$$\epsilon_h = \ln(h_{гш} / h_{хп}),$$

где $h_{гш}$ – высота горячедеформированных заготовок.

Механические свойства ГДПМ определяли измерением твердости HV по Виккерсу (нагрузка $F=98,07$ Н с выдержкой 10 с) и предела прочности на срез $\tau_{ср}$ цилиндрических образцов. Синхронный термический анализ, объединяющий в одном измерении термогравиметрию (ТГ) с дифференци-

альной сканирующей калориметрией (ДСК), проводился на приборе STA 449 Jupiter в воздушной и инертной (He) среде. Образцы нагревались со скоростью 20 К/мин до 800°C. Рентгенофазовый анализ (РФА) проводился на дифрактометре ДРОН-7 при медном излучении.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ результатов экспериментальных исследований (табл. 2) влияния состава размольных сред на гранулометрический состав порошковых шихт показал, что в процессе МХА при использовании жидких сред НВРБК и спирта происходит протекание конкурирующих процессов диспергирования-агломерации, приводящих к агломерированию частиц шихты алюминий-кремний-графит ($КАГ_0=1,21-1,48$).

Таблица 2

Остаток шихты на сите (% мас.), средний размер частиц $d_{0,1}$, $КАГ_{0,1}$ и значения ПАГ

Технология	ΔRi, % мас.								d ₀ , мкм	КАГ ₀	ПАГ
	-63	-100 +63	-160 +100	-200 +160	-250 +200	-315 +250	-400 +315	-630 +400	d ₁ , мкм	КАГ ₁	
T1	61,9	17,9	12,1	2,3	3,7	1,4	0,5	0,2	69	1,21	0,50
	33,4	21,3	10,7	0,9	0,2	33,2	0,2	0,0	139	2,43	
T2	58,5	16,6	2,3	7,5	11,3	3,8	0,0	0,0	85	1,48	0,59
	40,7	21,0	2,6	1,3	5,2	11,4	17,9	0,0	143	2,51	

Растирание пестиком в ступке шихт алюминий-кремний-графит приводит к бимодальному

распределению вторично агломерированных ($ПАГ=0,5-0,59$) частиц путем формирования новых связей. Рентгенофазовый анализ (рис. 1) шихты алюминий-кремний-графит, обработанной в жидкой среде НВРБК, показал, что в процессе механохимической активации формируется твердый раствор Al_9Si с гранецентрированной кубической структурой решетки, находящийся в неравновесном состоянии, по аналогии с формированием твердого раствора $Al_{0,94}Si_{0,06}$ в процессе закалки сплава Al-Si [12].

В результате синхронного термического анализа (рис. 2) в воздушной среде, механохимически активированной в жидкой среде НВРБК шихты алюминий-кремний-графит, выявлен экзотермический эффект с максимумом при температуре 614,3°C, обусловленный не только окислением Al с пониженной интенсивностью, но и протеканием экзотермических реакций между компонентами шихты [13, 14, 6].

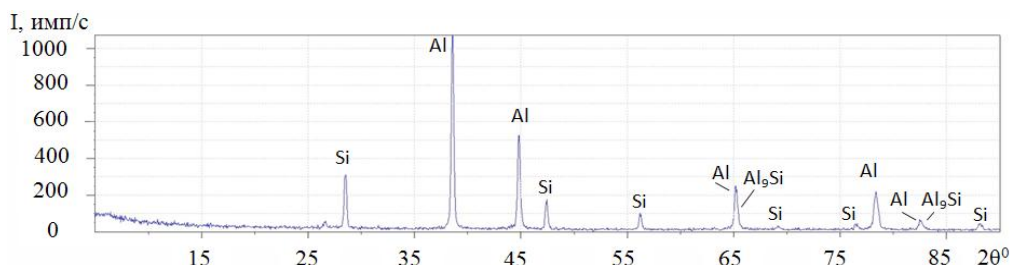
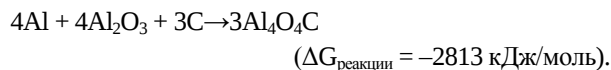
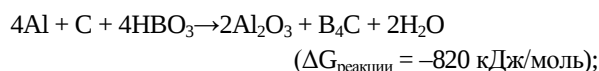
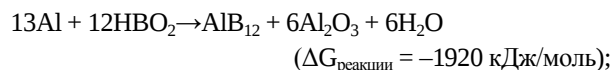
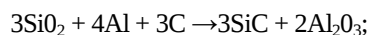
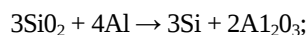


Рис. 1. Дифрактограмма шихты Al-Si, полученной по технологии T1

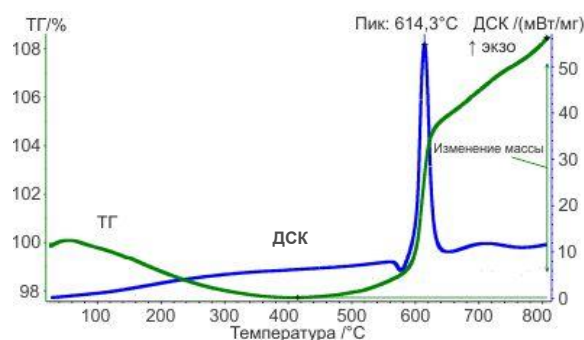


Рис. 2. Кривые теплового потока (ДСК) и изменения массы (ТГ) шихты алюминий-кремний-графит, полученной по технологии T1

Результаты экспериментальных исследований процессов уплотнения при ХП и ГШ заготовок, механических свойств ГДПМ Al-Si-C представлены в табл. 3. Переход от обработки шихты алюминий-кремний-графит в жидкой среде спирта (Т2) к НВРБК (Т1) обеспечивает снижение значения относительной плотности холоднопрессованной формовки с 0,822 до 0,778.

Таблица 3

Экспериментальные значения $\theta_{гш}$, ε_h , $T_{ср}$ и HV при различной приведенной работе горячей штамповки ($w_{гш}$)

Технология	$\theta_{хп}$	Выходные параметры	Значения $w_{гш}$, МДж/м ³			
			1-5	17	30	70
Т1	0,778	$\theta_{гш}$	0,754	0,990	1,000	0,989
		ε_h	-0,099	-0,466	-0,473	-0,561
		$T_{ср}$	68	215	215	192
		HV	71	254	252	262
Т2	0,822	$\theta_{гш}$	0,772	0,949	0,985	0,965
		ε_h	-0,019	-0,294	-0,299	-0,385
		$T_{ср}$	—	68	108	57
		HV	28	77	91	123

Протекание экзотермических реакций в процессе нагрева (650°C) порошковых формовок

интенсифицировало прогрев по всему объему. Кратковременный (0,12 кс) нагрев не приводит к чрезмерному размягчению образцов, препятствующему проведению ГШ в условиях компактирования неостывших продуктов реакций. Проведенный рентгенофазовый анализ (рис. 3) формовки на основе шихт алюминий-кремний-графит, обработанной в НВРБК (Т1), прошедшей нагрев, показал, что исчезает твердый раствор Al_9Si , а основными фазами, формирующими материал, являются Al и Si.

Зависимости $\theta_{гш}$ ($w_{гш}$) для шихты алюминий-кремний-графит, обработанной в средах НВРБК и спирта, характеризуются уплотнением при увеличении значений $w_{гш}$ до критических значений, равных 36 МДж/м³, с последующим разуплотнением (рис. 4). Использование механохимически активированной в НВРБК шихты алюминий-кремний-графит обеспечивает активацию процессов горячего доуплотнения ($|\varepsilon_h|=0,561$), связанную с пониженной сдвиговой вязкости B_2O_3 , плакирующего частицы Al и Si при температурах кратковременного нагрева (650°C).

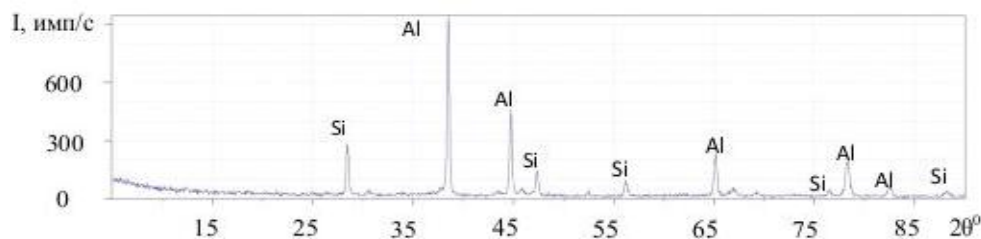


Рис. 3. Дифрактограмма материала формовки после нагрева на основе шихты алюминий-кремний-графит, полученной по технологии Т1

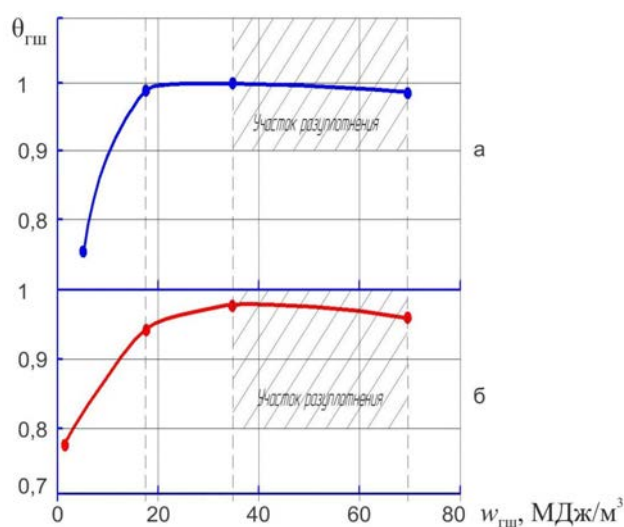


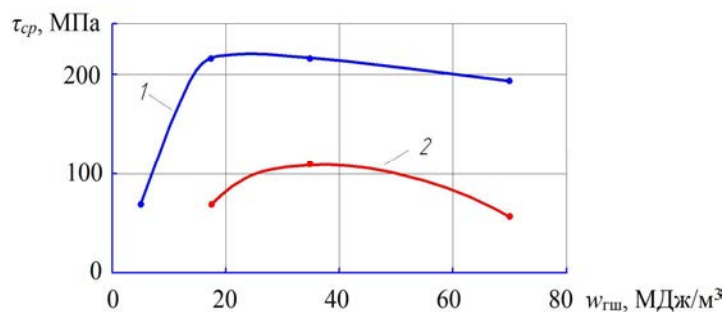
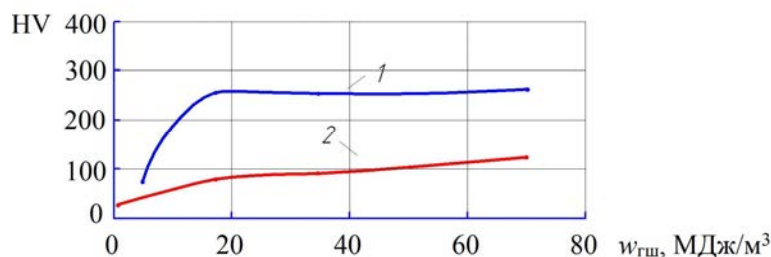
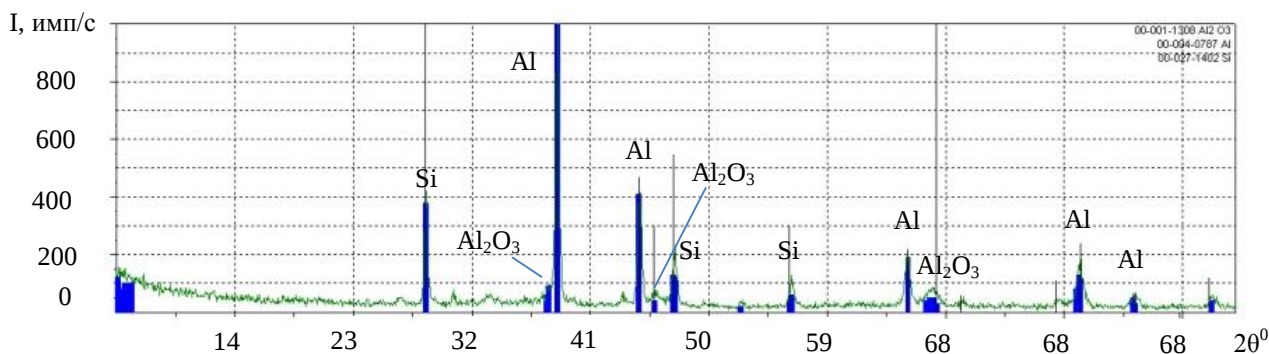
Рис. 4. Графики зависимости $\theta_{гш}=f(w_{гш})$ Т1(а), Т2(б)

Зависимости влияния приведенной удельной работы на значения предела прочности на срез $\tau_{ср}$ ($w_{гш}$) для шихт алюминий-кремний-графит, обработанных в средах НВРБК и спирта, характеризуются экстремальным характером (рис. 5). Образец на основе механохимически активированной в среде спирта шихты алюминий-кремний-графит, полученный ГШ при минимальном значении $w_{гш}$, равном 1 МДж/м³, разрушился в процессе механической обработки. Увеличение приведенной работы горячей штамповки с 17 до 36 МДж/м³ приводит к повышению предела прочности ГДПМ на срез $\tau_{ср}$ до максимального значения 108 МПа, дальнейший рост значений $w_{гш}$ приводит к разупрочнению материала. В процессе ГШ образцов на основе механохимически активированной в НВРБК шихты алюминий-кремний-графит достигается интенсивное повышение значений $\tau_{ср}$ ГДПМ на этапе

уплотнения ($w_{гш}=1-17$ МДж/м³). При оптимальном значении $w_{гш}$, равном 17 МДж/м³, наблюдается максимальное значение $\tau_{ср}$, равное 192 МПа.

Зависимость HV ($w_{гш}$) для шихт алюминий-кремний-графит, обработанных в средах НВРБК и спирта, характеризуется непрерывным ростом значений HV (рис. 6). При использовании образцов на основе механохимически активированной в НВРБК шихты алюминий-кремний-графит в процессе ГШ достигается интенсивное повышение значений HV ГДПМ на начальном этапе ($w_{гш}=1-17$ МДж/м³) и достигается локальный максимум 262 HV.

Рентгенофазовый анализ (рис. 7) показал возможность формирования ГДПМ горячедоформованного материала на основе шихты алюминий-кремний-графит, механохимически активированной в среде НВРБК с пониженным содержанием Al_2O_3 .

Рис. 5. Графики зависимости $\tau_{ср}=f(w_{гш})$ Рис. 6. Графики зависимости $HV=f(w_{гш})$ Рис. 7. Дифрактограмма ГДПМ Al-Si-C (T1) при значении приведенной работы горячей штамповки, равной 17 МДж/м³

Выводы

Установлены закономерности влияния состава размольных сред на формирование структуры и свойств ГДПМ Al-Si-C на основе механохимически активированных шихт. Использование НВРБК в качестве размольной среды обеспечивает активацию процессов уплотнения при ГШ, характеризующуюся повышенными абсолютными значениями высотной деформации. Предложена энергоэффективная технология получения ГДПМ Al-Si-C на основе механохимически активированной в НВРБК шихты с повышенными механическими свойствами ($\tau_{ср}=192$ МПа и 262 HV) при пониженном значении приведенной работы горячей штамповки 17 МДж/м³.

Список литературы

1. Спеченные материалы из алюминиевых порошков / В.Г. Гопиенко, М.Е. Смагоринский, А.А. Григорьев, А.Д. Беллавин; под ред. М.Е. Смагоринского. М.: Металлургия, 1993. 320 с.
2. Dispersion Strengthening in a Hypereutectic Al-Si Alloy Prepared by Extrusion of Rapidly Solidified Powder / Matsuura Kiyotaka, Suzuki Kazuhiro, Ohmi Tatsuya, Kudoh Masayuki [и др.] // *Metalurgical and Materials Transactions*. 2004. № 1. С. 333–339.
3. Витязь П.А., Ловшенко Ф.Г., Ловшенко Г.Ф. Механически легированные сплавы на основе алюминия и меди. Мн.: Беларуская наука, 1998. 351 с.
4. Malchere A., Gaffet E. Mechanosynthesis structural study of the ternary system Al-Si-C. // *J. de Physique. Sec. IV*. 1994. Vol. 4 (C3). P. 251–256.
5. Технология получения композиционного материала системы Al-Al₂O₃-B₂O₃ / Л.У. Котиева, Н.М. Иевлева, С.Д. Шляпин и др. // *Цв. металлургия*. 1983. №5. С. 25–28.
6. Введение в алюминиевый порошок упрочняющих фаз / Л.У. Котиева, Н.Л. Галетова, В.В. Павлова и др. // *Цветная металлургия*. 1986. №4. С. 35–37.
7. Горячедеформированные материалы на основе механохимически активированной стружки алюминиевого сплава Д-16 / М.А. Федосеева, Д.В. Слабкий, А.А. Волхонский, С.Н. Сергеев // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2012. Т. 2, № 3 (41). С. 20–25.
8. Дорофеев Ю.Г., Безбородов Е.Н., Сергеев С.Н. Горячедеформированные порошковые материалы на основе механически легированных шихт Al-C // *Физика и химия обработки материалов*. 2003. № 3. С. 64–72.
9. Дюжечкин М.К. Особенности формирования горячедеформированного материала на основе стружки алюминиевого сплава АЛ 30 // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки*. 2012. № 4. С. 60–62.
10. Гончарова О.Н. Инфильтрованные материалы на основе механически активированных в жидких средах порошковых шихт Fe-Ni / О.Н. Гончарова, С.Н. Сергеев // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2012. № 1. С. 98–101.
11. Коломиец Р.В. Порошковые высокопористые материалы Ni-Fe на основе механически активированных в жидких средах шихт: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2007. 11 с.
12. Chevrier J., Suck J.B. Soft Transverse Phonons in nonequilibrium fcc Al:Si solid solution quenched under high pressure // *Physical review letters*. 1988. № 5. С. 554–557.
13. Громов Д.Г. Учебно-методическое пособие для самостоятельной работы студентов по дисциплине «Металлизация в системах с наноразмерными элементами». М.: МИЭТ, 2011. 204 с.
14. Сборник научных работ студентов высших учебных заведений Республики Беларусь «НИРС, 2006» / редкол.: А.И. Жук (пред.) [и др.]. Минск: Изд. центр БГУ, 2007. 375 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

SPECIAL FEATURES OF EFFECT OF GRINDING MEDIA DURING MECHANOCHEMICAL ACTIVATION OF A MIXTURE ON THE FORMATION OF HOT-DEFORMED AL-SI-C POWDER MATERIAL

Dyuzhechkin Mikhail Konstantinovich – engineer, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia. E-mail: m.tsenturion@yandex.ru.

Sergeenko Sergei Nikolaevich – Ph.D. (Eng.), Senior Researcher, Deputy Head of the Mechanical Faculty for Research, Professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia.

Abstract. This paper studies the effect of grinding media and reduced energy of powder billet hot stamping on the structure and properties of hot-deformed Al-Si-C materials based on mechanochemically activated mixtures. We determined formation of Al₉Si solid solution in a nonequilibrium state in the process of mechanochemical activation of the aluminum-silicon-graphite mixture. This paper suggests an energy-efficient technology for production of a hot-deformed Al-Si-C powder material with increased values of shear strength (192 Mpa) and hardness (262 HV) at a lower value of reduced energy of hot stamping.

Keywords: mechanochemical activation, hot-deformed powder material, aluminum, silicon, graphite, structure, agglomerate.

References

1. Gopienko V.G., Smagorinskiy M.E., Grigoriev A.A., Bellavin A.D. *Spechennye materialy iz alyuminiyevykh poroshkov* [Sintered materials of aluminum powder]. Moscow: Metallurgiya, 1993, 320 p.
2. Matsuura Kiyotaka, Suzuki Kazuhiro, Ohmi Tatsuya, Kudoh Masayuki and others. Dispersion Strengthening in a Hypereutectic Al-Si Alloy Prepared by Extrusion of Rapidly Solidified Powder. *Metalurgical and Materials Transactions*, 2004, no. 1, pp. 333–339.
3. Vityaz P.A., Lovshenko F.G., Lovshenko G.F. *Mekhanicheski legirovannye splavy na osnove alyuminiya i medi* [The mechanically alloyed aluminum-base alloys and copper]. Minsk: Belarusian science, 1998, 351 p.
4. Malchere A., Gaffet E. Mechanosynthesis structural study of the ternary system Al-Si-C. *J. de Physique. Sec. IV*, 1994, vol. 4 (C3), pp. 251–256.
5. Kotieva L.U., Ievleva N.M., Shlyapin S.D. and others. Al-Al₂O₃-

- B₂O₃ composite material production. *Nonferrous metallurgy*, 1983, no. 5, pp. 25–28.
6. Kotieva L.U., Galetova N.L., Pavlova V.V. and others. Adding strengthening phases in aluminum powder. *Nonferrous metallurgy*, 1986, no. 4, pp. 35–37.
7. Fedoseyeva M.A., Slabkiy D.V., Volkonskiy A.A., Sergeenko S.N. Hot-deformed materials based on mechanochemically activated swarf of D-16 aluminum alloy. *Cherepovets State University Bulletin*, 2012, no. 3, pp. 20–25.
8. Dorofeev Yu.G., Bezborodov E.N., Sergeenko S.N. Hot-deformed powder materials based on mechanically alloyed Al-C mixtures. *Physics and chemistry of materials processing*, 2003, no. 3, pp. 64–72.
9. Dyuzhechkin M.K. Particular features of hot deformed materials compacted from swarf of AL 30 aluminum alloy. *News of higher educational institutions. North Caucasian region. Technical sciences*, 2012, no. 4, pp. 60–62.
10. Goncharova O.N., Sergeenko S.N. Infiltrated materials based on Fe-Ni powder mixtures mechanically activated in liquid medium. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012, no. 1, pp. 98–101.
11. Kolomiets R.V. Ni-Fe highly porous powdered materials based on mixtures mechanically activated in liquid medium. Extended abstract of PhD dissertation. Novocherkassk, 2007, 11 p.
12. Chevrier J., Suck J.B. Soft transverse phonons in nonequilibrium fcc Al:Si solid solution quenched under high pressure. *Physical review letters*, 1988, no. 5, pp. 554–557.
13. Gromov D.G. Self-instructional study guide for students of the course: Metallization in systems with nanoscale elements]. Moscow: MIET, 2011, 204 p.
14. Collection of research papers by students of higher educational institutions of the republic of Belarus, *NIRS*, 2006. Edited by Zhuk A.I. et al. Minsk: BSU, 2007, 375 p.

УДК 621.336

НОВЫЕ СПОСОБЫ И УСТРОЙСТВА, ДЕГАЗИРУЮЩИЕ УГЛЕРОДНЫЕ ПОРОШКОВЫЕ КОМПОЗИЦИИ ПЕРЕД КОМПАКТИРОВАНИЕМ

Самодурова М.Н., Барков Л.А., Джигун Н.С., Латфулина Ю.С.

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

Аннотация. Описаны новые способы компактирования углеродных порошковых композиций и новые конструкции устройств, разработанные авторами статьи на уровне изобретений, позволяющие перед основной операцией формования удалять значительные объемы газов и паров жидкостей из засыпки порошка в пресс-форму и из прессовки.

Ключевые слова: углеродная композиция, способ компактирования, дегазирующее устройство, пресс-форма.

Введение

Газонасыщение углеродных материалов – явление адсорбции, было открыто и описано шведским ученым К.В. Шееле еще в 1773 году [1]. При компактировании углеродных порошковых материалов наибольший интерес представляет физическая адсорбция, при которой молекулы газов и паров жидкостей удерживаются на поверхностях отдельных частиц порошковых композиций силами Ван-дер-Ваальса (Ван-дер-ваальсовая адсорбция). Изучение адсорбции показало, что скорость газонасыщения частиц углерода очень велика. Так, древесный уголь насыщается молекулами диоксида углерода, располагающимися в 2, 3 и более слоев, менее чем за 20 с [2].

Газонасыщенность углеродных композиций кроме химического состава зависит от их физических и технологических свойств [3, 4]. Так, важным физическим свойством, влияющим на газонасыщенность углеродных порошковых композиций, является гранулометрический состав порошков углерода. Из работы авторов [5], в которой представлены результаты исследова-

ния гранулометрического состава порошков графита по ТУ 1916-106-71-2000, используемых для получения изделий электротехнического назначения, следует, что частицы размерами менее 50 мкм, составляют 12,5% массы от общего количества частиц, частицы размерами 50–100 мкм – 5,3% массы и частицы 100–450 мкм – 89,2% массы. Средний размер частиц равен 280 мкм, что означает отношение этого графита к крупнозернистым материалам [6]. Важным технологическим свойством является насыпная плотность графита, в соответствии с публикацией [5] равная 0,67 г/см³ и составляющая 0,29 от плотности беспористого графита.

Новые способы, дегазирующие углеродные порошковые композиции перед их компактированием

Способ и устройство по патенту РФ № 2381870

Дегазация в изобретении [7], разработанная с участием одного из авторов статьи для дегазации ультрадисперсных порошков тугоплавких метал-

лов, выполняется путем приложения горизонтальных усилий к элементам разборной пресс-формы в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Такая схема приложения усилий на стадии предварительного прессования порошковой композиции с помощью нормальных и касательных сил позволяет интенсивно смещать частицы композиции и деформировать весь объем засыпки в полости пресс-формы. Это способствует быстрому удалению газов и паров жидкости из открытой в вертикальном направлении полости пресс-формы.

Элементы устройства по этому изобретению в виде конструкции пресс-формы показаны на **рис. 1**. На **рис. 1, а** показанная полость пресс-формы 3 с засыпанной в нее порошковой композицией имеет максимальные размеры. На засыпку порошка со стороны элементов 1, 2, 4 и 5 сборной пресс-формы после приложения горизонтальных усилий P_r к элементам 1 и 2 пресс-формы, заключенных в корпусе устройства 6, начинают действовать нормальные и касательные усилия (вектора усилий показаны стрелками). В корпусе устройства имеются упругие элементы 7, взаимодействующие с элементами 2 и 4 сборной пресс-формы. Показанная на **рис. 1, б** полость пресс-формы 3 с засыпкой порошковой композиции имеет минимальные размеры. Этим размерам соответствует сечение вертикального пуансона (не показан), осуществляющего компактирование изделия из предварительно подпрессованной порошковой композиции.

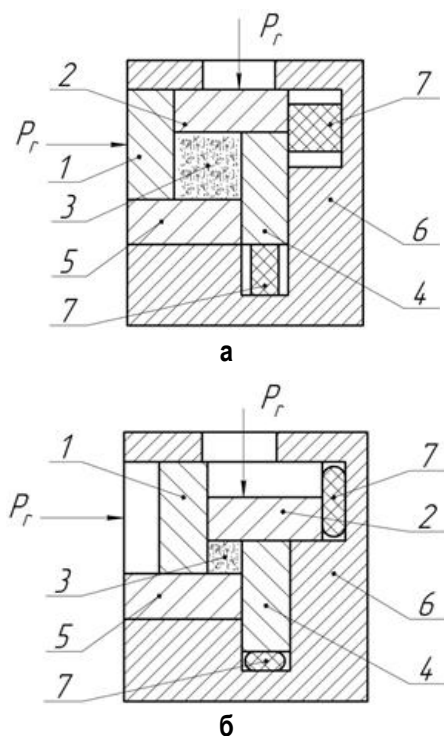


Рис. 1. Конструкция пресс-формы [7]:
а – перед предварительным уплотнением;
б – после предварительного уплотнения

Способ прессования углеродных композиций по патенту РФ № 2494835

Разработан новый способ прессования [8] из углеродных композиций контактных вставок троллейбусов, включающий предварительное прессование, например, центральной части вставки в виде желоба при заданных силовых, скоростных условиях и выдержкой под давлением, или предварительное прессование ее торцевых частей при заданных силовых и скоростных условиях, а затем окончательное прессование вставки. Последовательность операций предварительного и окончательного прессования приведена на **рис. 2**. Из **рис. 2, а** видно, что вертикальный пуансон 1 взаимодействует с усилием P_{B1} с засыпкой 2 порошка в ее центральной части, формируют ее центральную часть в виде желоба. При этом газы и пары интенсивно выходят через свободные от пуансона участки засыпки 2.

Как показано на **рис. 2, б**, во втором варианте предварительного прессования вертикальные пуансоны 3 взаимодействуют с усилием P_{B2} с засыпкой 2 порошка в ее периферийных участках, формируя торцевые части вставки. При этом воздух свободно выходит через центральную часть засыпки 2 порошка.

На стадии основного прессования (**рис. 2, в**) пуансоны 1 и 3 одновременно действуют с усилием P_{B3} на предварительно сформированную заготовку вставки.

Способ осуществляется следующим образом. После приготовления углеродного материала в виде композиции, содержащей 86% массы графита и 14% массы новолачной смолы, засыпают в пресс-форму и начинают предварительно прессовать с заявляемыми режимами либо центральную часть в виде желоба, либо в периферийной части вставки. После предварительного прессования частей вставки ведут одновременное окончательное прессование центральной и торцевой частей вставки при удельном давлении 45–55 МПа и скорости прессования 35–40 мм/с. К преимуществам нового способа следует отнести получения вставок повышенной плотности до 1,72 г/см³, повышенной прочности (прочность на сжатие до 62 МПа) и сниженного удельного электрического сопротивления до значений 47–56 Ом·м.

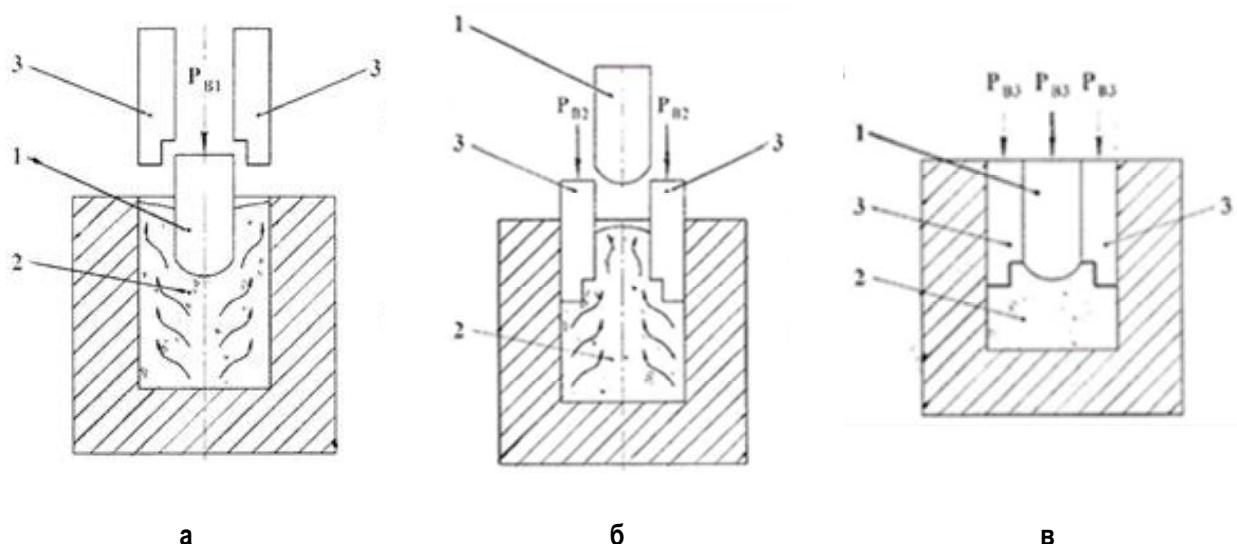


Рис. 2. Последовательность операций предварительного (а или б) и окончательного (в) формования вставки троллейбуса по новому способу [8]

Новые устройства и пресс-формы, дегазирующие углеродные композиции перед их компактированием

В процессе многолетней работы с предприятиями, производящими изделия из порошков тугоплавких металлов, одним из авторов статьи были разработаны новые конструкции устройств [9] и пресс-форм [10–12], дегазирующие порошковые композиции перед их компактированием. Особенно это важно выполнять на ультрадисперсных порошках вольфрама и молибдена со средними размерами частиц от одного до 3 мкм, компактирование таких порошков выполняется со скоростями пуансонов, равными 2,5 мм/с [13]. Эти устройства и пресс-формы могут быть успешно использованы для дегазации углеродных композиций перед их компактированием.

Устройство по патенту РФ № 2373025

Горизонтальные сечения этого устройства перед началом операции предварительного прессования показаны на рис. 3, а и на рис. 3, б – после окончания операции предварительного прессования, выполняемого горизонтальным усилием P_r .

При предварительном прессовании, когда полость пресс-формы открыта в вертикальном направлении, газы и пары интенсивно удаляются за счет действия нормальных и касательных сил на засыпку порошковой композиции. На рис. 3, а действующие силы показаны стрелками.

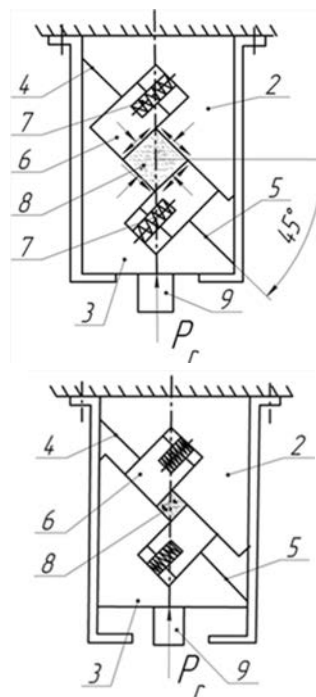


Рис. 3. Устройство для предварительного прессования углеродных композиций горизонтальным усилием P_r

Устройство для прессования заготовок содержит горизонтальный стол 1 (не показан) прессы с боковой его поверхностью, на столе установлены части 2 и 3 матрицы. Части 2, 3 имеют наклонные относительно боковой вертикальной поверхности стола рабочие поверхности 4, 5, угол наклона которых равен $\pi/4$. Часть 2 закреплена на столе 1 и у боковой его поверхности неподвижна. В частях 2, 3 матрицы перпендикулярно к наклонным рабочим поверхностям

4, 5 смонтированы деформирующие вставки 6 с пружинами 7, образующие вместе с наклонными плоскостями 4, 5 замкнутый калибр 8. Часть 3 матрицы соединена с горизонтальным пуансоном 9. Устройство снабжено вертикальным пуансоном 10 (не показан).

Устройство для прессования работает следующим образом. В калибр 8 засыпают порошок углеродной композиции. Включают привод горизонтального пуансона 9 (на рисунке не показан), который, перемещаясь, двигает часть 3 матрицы устройства. При этом пружины 7 сжимаются и перемещаются в деформирующие вставки 6, порошок формируется в калибре, образованном наклонными рабочими плоскостями 4, 5, соответственно частями 2, 3 матрицы и деформирующими вставками 6. После предварительного прессования ведут уплотнение заготовки по высоте (длине), перемещая вертикальный пуансон 10 (не показан). После этого вертикальный пуансон 10 и горизонтальный пуансон 9 возвращают в исходное положение. При этом часть 3 матрицы устройства также перемещается, и под действием пружин размеры калибра 8 увеличиваются. Это дает возможность снять сформированную заготовку со стола 1 устройства.

Устройство по патенту РФ на полезную модель №121762

Устройство в виде пресс-формы для прессования порошков [10], показанное на **рис. 4**, позволяет эффективно удалять из засыпки порошков пары жидкостей и газы, увеличивая тем самым плотность прессовок и улучшая механические и физические свойства готовых изделий. Пресс-форма состоит из корпуса 1, вертикальных основного и зажимного пуансонов соответственно 2, 3. В корпусе 1 размещены боковины 4, 5, 6, 7, образующие полость 8 для засыпки порошка. Две противолежащие боковины 4, 5 закреплены в корпусе 1 шарнирно на оси 9. Концы боковин 4, 5 имеют скошенные поверхности 10, контактирующие со скошенными поверхностями 11, выполненными на зажимном ползуне 3. Боковины 4, 5 контактируют с механизмом регулирования их угла поворота, выполненного в виде эксцентриков 12, закрепленных на оси 13. Имеются упругие элементы 14 возврата боковин 4, 5 в исходное положение. Пуансоны 2, 3 между собой смонтированы с зазором 15, равным 1–3 мм. Угол регулирования угла поворота боковин со скошенными концами определяет величину подпрессовки и равен, как правило, 15–30°.

Пресс-форма работает следующим образом. В полость 8, образованную размещенными в корпусе 1 боковинами 4, 5, 6, 7, засыпают порошок. Включают привод (на рисунке не показан)

зажимного ползуна 3, который, двигаясь вниз, посредством контакта скошенных поверхностей 10, 11 усилием P_3 поворачивает на оси 9 боковины 4, 5. Поворачиваясь, боковины 4, 5 воздействуют на находящийся между ними порошок, осуществляя его предварительную подпрессовку. Так как полость 8 в этот момент не закрыта сверху основным пуансоном 2, находящийся в засыпке порошка воздух свободно выходит из нее в атмосферу. После окончания подпрессовки включают привод (на рисунке не показан) основного пуансона 2, который с усилием P_0 осуществляет окончательное прессование заготовок или изделий. Угол поворота боковин 4, 5, а следовательно, величину подпрессовки регулируют эксцентриками 12 путем поворота оси 13. После окончания прессования перемещают вверх основной пуансон 2, отводят зажимной пуансон 3, при этом упругие элементы 14 возврата устанавливают боковины 4, 5 в исходное положение.

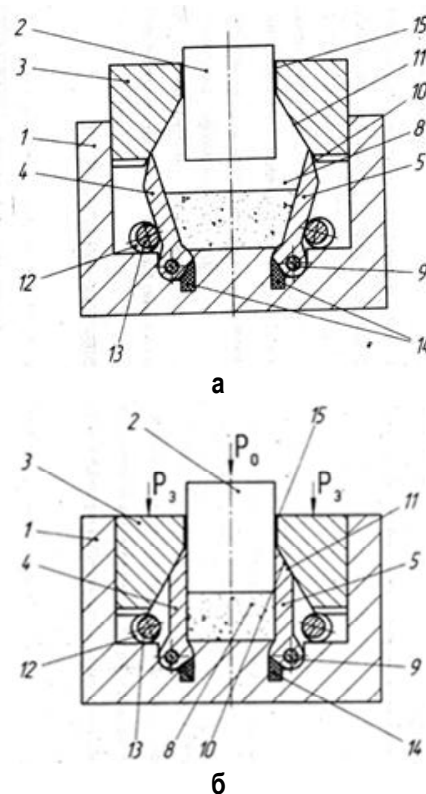


Рис. 4. Пресс-форма для прессования порошков:
а – исходное состояние матрицы с засыпкой порошка; б – состояние матрицы после прессования изделия

Устройство по патенту РФ на полезную модель №120591

Устройство в виде пресс-формы для прессования порошков [11], показанное на **рис. 5**, также успешно дегазирует порошковые углеродные композиции, увеличивает плотность прессовок и

улучшает механические и физические свойства готовых изделий.

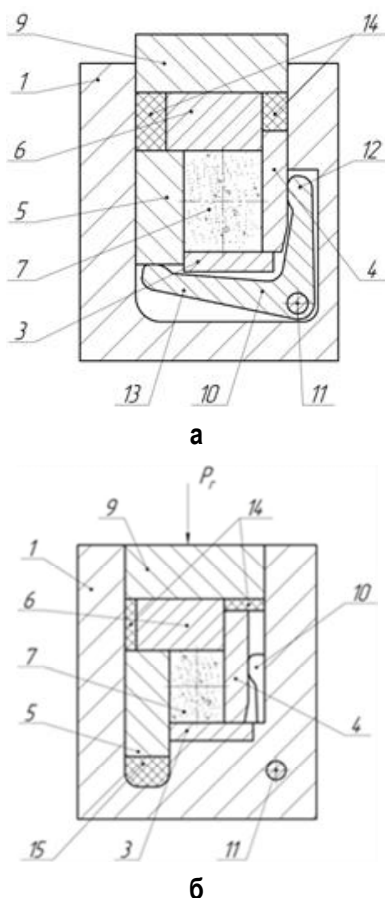


Рис. 5. Горизонтальные сечения устройства:
а – исходное положение полости пресс-формы
до предварительного прессования;
б – положение полости пресс-формы
после предварительного прессования

Пресс-форма, горизонтальные сечения которой до начала предварительного прессования и после его окончания показаны на **рис. 5, а** и **5, б**, состоит из корпуса устройства 1, установленного на плите пресса (не показаны). В корпусе устройства 1 размещена матрица пресс-формы, выполненная из четырех боковин 3, 4, 5, 6, образующих четырехгранную полость 7. Боковина 3 смонтирована в корпусе неподвижно. Пресс-форма снабжена вертикальным пуансоном и горизонтальным пуансоном 9. Механизм изменения размеров полости 7 состоит из двуплечих рычагов 10, закрепленных в корпусе на оси 11. Первое плечо 12 рычага 10 контактирует с боковиной 4, прилежащей к неподвижной боковине 3. Второе плечо 13 связано с боковиной 6, противолежащей неподвижной боковине 3 посредством боковины 5, противоположной контактирующей с первым плечом 12 рычага 10 боковиной 4. Между горизонтальным пуансоном 9 и боковинами 4, 5, кон-

тактирующими с плечами 12, 13 рычага 10, смонтированы упругие элементы 14. Между корпусом и контактирующей со вторым плечом рычага боковиной 6 расположены упругие элементы 15.

Пресс-форма работает следующим образом. После сборки пресс-формы на стол специализированного пресса устанавливают корпус пресс-формы с плитой. После чего в полость 7, образованную боковинами 3, 4, 5, 6 и плитой, засыпается порошок. Затем перемещают горизонтальный плунжер (на рисунке не показан), передающий усилие P_r на горизонтальный пуансон 9, который, в свою очередь, воздействуя на боковину 6 и сжимая упругие элементы 14, перемещает боковину 5. Боковина 5, контактируя с плечом 13 рычага 10, поворачивает его относительно оси 11. При этом плечом 12 рычаг 10 перемещает боковину 4. Происходит уменьшение размеров четырехгранной полости 7 для засыпки порошка при сохранении ее замкнутости и предварительное прессование засыпки, удаляющее из нее газы и пары жидкостей. После предварительного прессования порошка перемещают вертикальный пуансон 8, который производит окончательное компактирование изделия.

Пресс-форма по патенту РФ на полезную модель №137489

Поставленная задача по интенсивному удалению газов и паров из засыпки решается тем, что в пресс-форме для прессования порошковых композиций, например, на основе углерода, содержащей верхний и нижний пуансоны и матрицу, часть которой выполнена пористой, согласно предлагаемому в патенте решению, матрица по высоте выполнена составной, и нижняя ее часть, равная 1/5 высоты матрицы, изготовлена из высокопрочной инструментальной стали, а верхняя ее часть – из порошковой нержавеющей стали и имеет пропорционально изменяющуюся по высоте пористость, равную 48–50% у верхнего торца матрицы и 30–32% у нижнего торца, при этом наружные поверхности верхней части матрицы наклонены к ее нижней торцевой поверхности под углом 82–84 град [12].

Выполнение матрицы составной (**рис. 6**), у которой нижняя часть 4 изготовлена из высокопрочной инструментальной стали, верхняя 3 – из порошковой нержавеющей стали, состыкованных по плоскости 5, позволяет обеспечить ее необходимую прочность в процессе прессования и в то же время увеличить общий объем удаляемых газов и паров. Увеличение объема удаляемых газов и паров достигается переменной величиной пористости верхней части матрицы по высоте и выполнением наклона ее наружных стенок 6 к нижнему ее торцу, когда большая часть газов и паров удаляет-

ся вначале прессования. При входе верхнего пуансона 1 в полость матрицы газы и пары начинают удаляться вначале из ее объема, свободного от порошка. Интенсивность удаления газов и паров при этом будет максимальной, поскольку у верхнего торца матрицы максимальная пористость, обеспечивающая в стенках матрицы минимальной толщины каналы наибольшей проницаемости для газов и паров. После контакта рабочей поверхности верхнего пуансона с порошком интенсивность удаления газов из засыпки порошка снизится незначительно, поскольку будет интенсивно возрастать давление пуансона на засыпку порошка и на газы с порошками, находящиеся еще в открытых порах засыпки. Максимальное удельное давление пуансона, равное 50 МПа, обеспечит удаление газов и даже паров из прессовки. Таким образом, описанная матрица с заданной пористостью по высоте верхней части обеспечивает максимальное удаление газов и паров из получаемых заготовок и изделий, увеличивая их плотность.

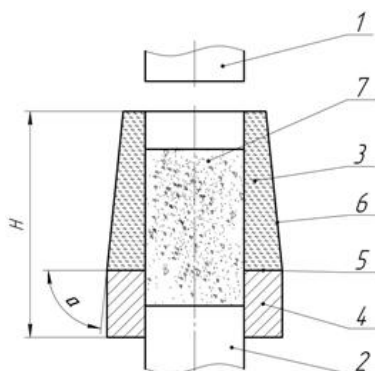


Рис. 6. Пресс-форма для интенсивного удаления из засыпки газов и паров на стадии предварительного прессования

Список литературы

1. Брунауер С. Адсорбция газов и паров. М.: Изд-во иностр. лит., 1948. 768 с.
2. Freundlich H. Colloid and capillary chemistry, 1926. 108 p.
3. Фиалков А. С. Углеродистые материалы. М.: Энергия, 1979. 320 с.
4. Шулепов С. В. Физика углеродных материалов. Челябинск: Metallurgy. Челябин. отд-ние, 1990. 336 с.
5. Феноменология уплотнения порошков композиционных материалов на основе вольфрама и углерода / Самодурова М.Н., Барков Л. А., Мырин С. А. [и др.] // Metallurg. 2013. №10. С. 76–84.
6. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / Анциферов В.Н., Бобров Г.В., Дружинин Л.К. [и др.]. М.: Металлургия, 1987. 792 с.
7. Пат. 2381870 РФ, МПК B22F3/02. Способ прессования штабиков из порошков тугоплавких металлов и пресс-форма для их прессования / Мырин С.А., Барков Л.А., Чаплыгин Б.А. [и др.]. Заявка 2007149830/02 от 19.11.2007. Оpubл. 20.02.2010. Бюл. №5.
8. Пат. 2494835 РФ, МПК B22F3/02. Способ прессования углеродных контактных вставок троллейбусов / Самодурова М.Н., Иванов В.А., Барков Л.А. Заявка 2012128703/02 от 09.07.2012. Оpubл. 10.10.2013. Бюл. №28.
9. Пат. 2373025 РФ, МПК B22F3/02. Устройство для прессования заготовок из порошков тугоплавких металлов / Барков Л.А., Мырин С.А., Чаплыгин А.Б. [и др.]. Заявка 2008108606/02 от 04.03.2008. Оpubл. 20.11.2009. Бюл. №32.
10. Пат. на полезную модель 121762 РФ, МПК B22F3/03. Пресс-форма для прессования порошков / Самодурова М.Н., Иванов В.А., Барков Л.А. [и др.]. Заявка 2012125863/02 от 20.06.2012. Оpubл. 10.11.2012. Бюл. №31.
11. Пат. на полезную модель 120591 РФ, МПК B22F3/03. Пресс-форма для прессования порошков / Самодурова М.Н., Иванов В.А., Барков Л.А. [и др.]. Заявка 2012118025/02 от 02.05.2012. Оpubл. 27.09.2012. Бюл. №27.
12. Пат. на полезную модель 137489 РФ, МПК B22F3/03. Пресс-форма для прессования порошковых композиций на основе углерода / Самодурова М.Н., Барков Л.А., Иванов В.А. Заявка 2013137998 от 13.08.2013. Оpubл. 20.02.2014. Бюл. №5.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

NEW METHODS AND MECHANISMS DEGASSING CARBON POWDER COMPOSITIONS BEFORE COMPACTING

Samodurova Marina Nikolaevna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Director of ERC Resource Center of Special Metallurgy, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: sm@susu.ac.ru.

Barkov Leonid Andreevich – D.Sc. (Eng.), Professor, Deputy Director for Research, ERC Resource Center of Special Metallurgy, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: barkovla@susu.ac.ru.

Dzhigun Nikolay Sergeevich – Postgraduate Student, ERC Resource Center of Special Metallurgy, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: tusove@gmail.com.

Latfulina Yuliya Sergeevna – Engineer, ERC Resource Center of Special Metallurgy, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: latfulina174@gmail.com.

Abstract. This paper describes new methods of compacting of carbon powder compositions and new structures of mechanisms, which were developed by the authors of this article as inventors, ensuring removal of considerable vol-

umes of gased and vapors from charged powder in the die and from pressed powder before a main forming operation.

Keywords: carbon composition, method of compacting, degassing mechanism, die.

References

1. Brunauer S. Adsorption of gases and vapors. Moscow: Foreign Literature Publishing House, 1948, 768 p.
2. Freundlich H. Colloid and capillary chemistry, 1926, 108 p.
3. Fialkov A.S. *Uglegrafitovye materialy* [Graphitized carbon materials]. Moscow: Energiya, 1979, 320 p.
4. Shulepov S. V. *Fizika uglerodnykh materialov* [Physics of carbon materials]. Chelyabinsk: Metallurgiya, Chelyabinsk Section, 1990, 336 p.
5. Samodurova M.N., Barkov L.A., Mymrin S.A. et al. Phenomenology of powder densification of composite materials based on tungsten and carbon. *Metallurg*, 2013, no. 10. pp. 76–84.
6. Antsiferov V. N., Bobrov G. V., Druzhinin L. K. et al. *Poroshkovaya metallurgiya i napylenные pokrytiya* [Powder metallurgy and sprayed coatings]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 792 p.
7. Mymrin S.A., Barkov L.A., Chaplygin B.A. et al. A method for extrusion of bars of refractory metal powders and a die for their compacting. Patent of the Russian Federation no. 2381870, IPC B22F3/02. Application 2007149830/02 dated 19.11.2007. Published on 20.02.2010. Bulletin no. 5.
8. Samodurova M.N., Ivanov V.A., Barkov L.A. A method for pressing carbon contact strips for trolley buses. Patent of the Russian Federation no. 2494835, IPC B22F3/02. Application 2012128703/02 dated 09.07.2012. Published on 10.10.2013. Bulletin no. 28.
9. Barkov L.A., Mymrin S.A., Chaplygin A.B. et al. An apparatus for molding preforms from refractory metal powders. Patent of the Russian Federation no. 2373025, IPC B22F3/02. Application 2008108606/02 dated 04.03.2008. Published on 20.11.2009. Bulletin no. 32.
10. Samodurova M.N., Ivanov V.A., Barkov L.A. et al. A die for molding powders. Useful model patent of the Russian Federation no. 121762, IPC B22F3/03. Application 2012125863/02 dated 20.06.2012. Published on 10.11.2012. Bulletin no. 31.
11. Samodurova M.N., Ivanov V.A., Barkov L.A. et al. A die for molding powders. Useful model patent of the Russian Federation no. 120591, IPC B22F3/03. Application 2012118025/02 dated 02.05.2012. Published on 27.09.2012. Bulletin no. 27.
12. Samodurova M.N., Barkov L.A., Ivanov V.A. A die for pressing powder compositions based on carbon. Useful model patent of the Russian Federation no. 137489, IPC B22F3/03. Application 2013137998 dated 13.08.2013. Published on 20.02.2014. Bulletin no. 5.

УДК 621.746+621.771

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛОС

Лехов О.С.¹, Турлаев В.В.², Лисин И.В.¹, Туев М.Ю.¹¹ Российский государственный профессионально-педагогический университет, г. Екатеринбург.² ООО «Уральский дизель-моторный завод», г. Екатеринбург.

Аннотация. Изложены преимущества и определены основные параметры технологии производства биметаллических полос на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Приведены результаты теплового расчёта совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении биметалла сталь-медь.

Ключевые слова: биметалл сталь-медь, совмещенный процесс, непрерывное литьё и деформация, температурное поле, сборный кристаллизатор.

Введение

Возрастающие потребности промышленности в биметаллах вызвали необходимость создания принципиально новых процессов их производства с целью повышения производительности, расширения сортамента и улучшения качества биметаллических полос. В работах [1,2] отмечается, что разработаны технологии холодного плакирования широкого класса биметаллов: сталь + медные сплавы, сталь + алюминиевые сплавы, сталь + никелевые сплавы, которые находят широкое применение в электронной, электротехнической, автомобильной, оборонной промышленности. К основным технологическим задачам в развитии этих процессов относятся увеличение ширины биметаллических листов, производимых рулонным методом, а также по-

лучение биметалла с повышенной толщиной плакировочных слоев (до 10–15% от толщины основного слоя).

Технические и технологические разработки

Проблемы производства биметаллических листов могут быть решены с использованием принципиально новой установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации [3]. Разработана ресурсосберегающая технология производства биметаллических полос [4] на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации (рис. 1).

Предлагаемая технология непрерывного литья и деформации биметаллической полосы [4] включает подачу в неразъемный кристаллизатор металла плакировочного слоя (например, сплав алюминия) в жидком состоянии и предусматри-

вает в разъемной части сборного кристаллизатора соединение полосы второго металла (сталь) в твердом состоянии с кристаллизующейся оболочкой плакировочного слоя путем обжатия с высокой степенью деформации с последующей калибровкой биметаллической полосы.

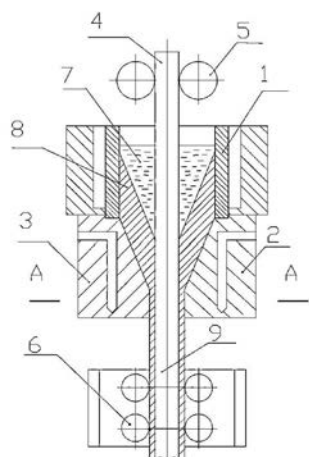


Рис. 1. Способ получения биметаллической полосы: 1 – неразъемный кристаллизатор; 2, 3 – стенки-бойки разъемного кристаллизатора; 4, 5 – направляющие ролики; 6 – тянущие ролики; 7 – расплав металла плакирующего слоя; 8 – оболочка плакирующего металла; 9 – полоса основного металла

Следует отметить, что скорость непрерывного литья, равная скорости прохождения полосы основного металла через неразъемный кристаллизатор, определяется заданной толщиной плакировочного слоя. Таким образом, предлагаемый способ предусматривает пропускание полосы основного металла через расплав металла плакировочного слоя, который подается в водоохлаждаемый неразъемный кристаллизатор, с последующей деформацией стенками-бойками затвердевшего биметаллического слитка.

Основные преимущества предлагаемой технологии:

- повышение качества биметалла за счёт обжатия стенками-бойками биметаллического слитка обеспечивает надёжное сваривание слоёв, получение мелкозернистой однородной структуры металла плакировочного слоя, хорошего качества поверхности полосы и высокой точности толщины плакировочного слоя;
- расширение сортамента биметаллических полос;
- повышение производительности процесса непрерывного литья и деформации биметаллических полос.

Определим соотношение между скоростью прохождения биметаллической полосы v_1 и толщиной корочки δ металла плакировочного слоя.

Толщина корочки

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

где k – коэффициент кристаллизации, $\frac{м}{мин^{1/2}}$; τ – время кристаллизации, мин.

$$\tau = \frac{H}{v_1}, \quad (2)$$

где H – высота расплава металла в неразъемном кристаллизаторе, м.

В результате толщина корочки

$$\delta = k\sqrt{\frac{H}{v_1}}. \quad (3)$$

Отсюда

$$v_1 = k^2 \cdot H / \delta^2, \text{ м / мин} \quad (4)$$

Следует отметить, что толщина корочки δ биметаллического слитка, выходящего из неразъемного кристаллизатора, определяется заданной толщиной плакировочного слоя и степенью его деформации стенками-бойками, обеспечивающей надёжное сваривание слоёв биметалла.

Для оценки новой технологии производства биметаллических полос было определено напряженно-деформированное состояние металла плакирующего слоя в очаге деформации при получении биметалла сталь-алюминий. Для расчета использован пакет ANSYS [5]. Значения модуля упругости и упрочнения и предела текучести для алюминия марки А5 определены зависимостью от температуры металла [6]. Материал плакировочного слоя в очаге деформации испытывает упругопластические деформации, которые достигают конечных значений. При исследовании напряженно-деформируемого состояния биметаллической полосы при деформации пренебрегли инерционными и массовыми силами, деформируемый металл считаем несжимаемым. При записи уравнений состояния использован случай простого нагружения. Для материала плакировочного слоя принята упругопластическая модель Прандля-Рейса. Так как задача сложная, то приняты изотермические условия деформации, т.е. разогрев деформируемого материала стенок-бойков не учитывается. Принимается, что трение на всей поверхности контакта подчиняется закону сухого трения Кулона, причём коэффициент трения постоянен на всей контактной поверхности.

Толщина полосы из стали принята равной 5 мм. Температура ее 300 град. Температура алюминия – 600 град. Толщина слоя алюминия на стальной по-

лосе принималась равной 0,5 мм. Коэффициент трения между стальной полосой и слоем алюминия принят равным 1,0, а между алюминием и стенкой-бойком – 0,1. Толщина оболочки σ плакирующего слоя из алюминия $\sigma = 3$ мм, скорость вытягивания оболочки с жидкой фазой из неразъемного кристаллизатора $v_1 = 8$ м/мин (рис. 2).

Расчетная схема процесса показана на рис. 2. При расчете со стороны внутренней поверхности очага деформации задавались статические граничные условия в виде ферростатического давления, равного 0,01 МПа.

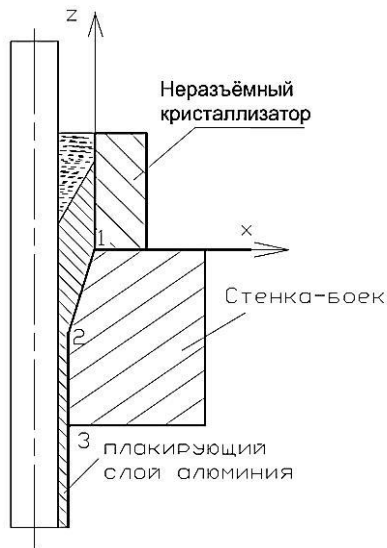


Рис. 2. Расчётная схема совмещённого процесса непрерывного литья и деформации при получении биметалла сталь-алюминий

На внешней поверхности очага деформации из алюминия принимаем температуру равной 530°C. Для этой температуры модуль упругости – 1088 МПа, модуль упрочнения – 0,163 МПа и предел текучести – 12,3 МПа. Для стенки-бойка модуль упругости принят равным 210 ГПа, а коэффициент Пуассона – 0,3. Коэффициент Пуассона для очага деформации принят равным 0,35.

Результаты получены решением задачи механики сплошной среды методом конечных элементов. Конкретно: использована объемная постановка контактной задачи теории упругопластичности при наличии больших деформаций и перемещений. Для стенки-бойка задавались перемещения, равные 5 мм, в направлениях, противоположных положительным направлениям осей X и Z. Величина подачи стенками-бойками биметаллической полосы за один цикл обжата – 28 мм, угловая скорость вращения эксцентриковых валов – 71 об./мин.

В качестве конечного элемента ис-

пользован двадцатиузловой объемный твердотельный конечный элемент SOLID 95 [1]. Размер элемента находился в диапазоне – от 0,5 до 1 мм. В нашем случае для моделирования совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении биметалла и определения напряженного состояния плакировочного слоя использован статический нелинейный анализ. Одним из способов получения нелинейного решения является разбиение нагрузки на шаги и подшаги. При этом количество шагов и подшагов следует задавать таким образом, чтобы обеспечить требуемую точность расчета и сходимость решения задачи.

При моделировании совмещенного процесса при получении биметалла и определении напряженного состояния плакировочного слоя непрерывного литья и деформации весь процесс был разбит на 90 шагов, поскольку деформация полосы происходит на угле поворота эксцентриковых валов 90 град. Пилотному узлу на каждом шаге задавалось кинематическое граничное условие в виде поворота эксцентриковых валов на угол, равный одному градусу. На каждом шаге (угле поворота эксцентриковых валов) полоса перемещалась и деформировалась за счет сил трения между полосой и перемещающейся стенкой-бойком сборного кристаллизатора. Для обеспечения сходимости и необходимой точности расчета каждый шаг разбивался на 1500 подшагов. Выбор такого количества подшагов обусловлен тем, что на каждом подшаге решения приращение пластических деформаций не должно превышать 5%.

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния металла плакирующего слоя из алюминия в очаге деформации представлены в виде эпюр напряжений. Приняты следующие основные обозначения: σ_x , σ_y , σ_z – напряжения в направлении осей X, Y, Z соответственно.

На рис. 3 представлены закономерности распределения нормальных напряжений вдоль оси X и на рис. 4 – касательных напряжений.

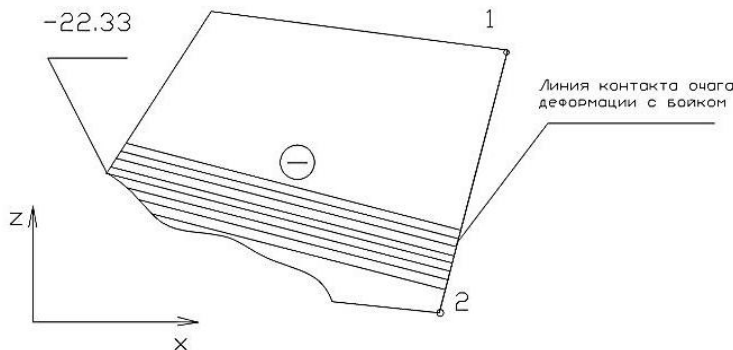


Рис. 3. Характер напряжения по оси X вдоль линии 1-2 очага деформации

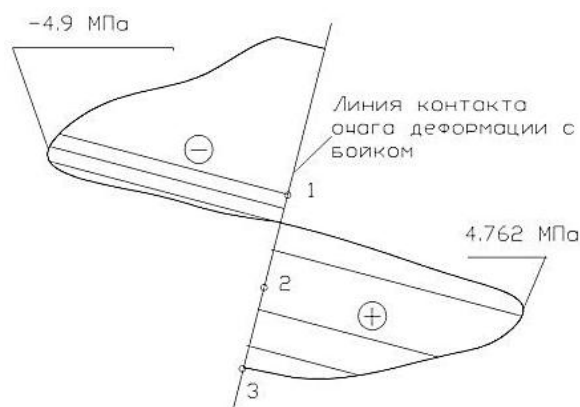


Рис. 4. Характер касательных напряжений вдоль линии 1-2-3 очага деформации

Положение точек смотри на рис. 2.

В табл. 1 приведены выборочные результаты по максимальным напряжениям по поверхности контакта плакировочного слоя в зоне очага деформации со стенкой-бойком.

Таблица 1

Выборочные результаты по максимальным напряжениям (МПа) по поверхности контакта очага деформации со стенкой-бойком

σ_x	σ_y	σ_z	σ_{zx}
-22	-12	-16	-5

* Знак (-) означает, что напряжения на контактной поверхности биметаллической полосы со стенкой-бойком сжимающие.

Представленные результаты свидетельствуют о благоприятной схеме напряженного состояния в очаге деформации при получении биметалла сталь-алюминий. Как следует из представленных эпюр напряжений, металл плакирующих слоев находится практически в условиях всестороннего сжатия. Таким образом, циклическая деформация биметаллической полосы с высоким уровнем сжимающих напряжений на контакте ее со стенкой-бойком сборного кристаллизатора обеспечивает интенсивную пластическую деформацию плакирующих слоев из алюминия, что способствует надежному свариванию слоев и получению мелкозернистой структуры плакировочного слоя из алюминия. В табл. 2 представлены выборочные результаты по перемещениям металла плакировочного слоя в направлении оси Z для точек 1–3, показанных на рис. 2.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что при деформации затвердевший металл плакировочного слоя не выдавливается в конус жидкой фазы, а перемещается в направлении непрерывного литья и деформации. При интенсивной циклической деформации стенками-бойками биметаллической полосы перемещение плакиро-

вочных слоев из алюминия относительно основной стальной полосы будет способствовать разрушению окисных пленок и прочному сцеплению компонентов биметалла.

Таблица 2

Значения перемещений металла в направлении оси Z

Номер точки	Перемещения (u_z , мм)
1	-1,6
2	-15,3
3	-22,3

Для оценки новой технологии производства биметаллических полос и оценки качества биметалла проведены экспериментальные исследования на лабораторной установке при получении биметалла сталь-алюминий. В процессе эксперимента в кристаллизатор заливали расплав алюминия и одновременно через него пропускали стальную полосу толщиной 5 мм. В разъемной части кристаллизатора кристаллизующиеся корочки плакирующего слоя соединяли с основной полосой по всему ее периметру и подвергали циклической деформации подвижными стенками-бойками с последующей калибровкой.

Расстояние между рабочими поверхностями калибрующего участка кристаллизатора было равно 6 мм, поэтому толщина плакирующего слоя составила 0,5 мм и при этом получена хорошая поверхность биметаллической полосы.

Большим преимуществом предлагаемой технологии получения биметалла в сравнении с существующими является то, что она позволяет получить плакирующий слой одинаковой толщины по всему периметру основной полосы. Это особенно важно при получении биметалла типа сталь-медь и т.п. для электротехнической промышленности.

В процессе эксперимента установлено, что надежность сцепления слоев биметалла и качество поверхности биметаллической полосы хорошие.

Заключение

Предложен и обоснован принципиально новый совмещенный процесс непрерывного литья и деформации для производства биметаллических полос. Внедрение в производство установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации позволит создать ресурсосберегающие технологические процессы, существенно повысить производительность, расширить сортамент и повысить качество непрерывных биметаллических полос.

Список литературы

1. Кузнецов Е.В., Кобелев А.Г. Биметаллы: современные технологии и применение // Пластическая деформация сталей и сплавов: сб. науч. трудов. М.: МИСиС, 1996. С. 296-302.

2. Кузнецов Е.В. Основные направления развития технологии производства биметаллов // Теория и технология процессов пластической деформации: труды науч.-техн. конференции. М.: МИСиС, 1997. С. 111–119.
3. Пат. 2077407 РФ. Способ непрерывного литья заготовок и устройство для его осуществления / О.С. Лехов // БИ. 2000. №5.
4. Пат. 2064364 Россия. Способ получения биметаллической полосы / О.С.Лехов.
5. ANSYS. Structural analysis Guide. Rel.6.0. <http://www.cadfern.ru>
6. Лехов О.С., Комратов Ю.С. Совмещённые процессы непрерывного литья и деформации для производства проката. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

THE PRODUCTION OF BIMETALLIC STRIPS WITHIN A COMBINED CONTINUOUS CASTING AND DEFORMATION PROCESS

Lekhov Oleg Stepanovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Mechanics Department, Russian State Professional Pedagogical University, Ekaterinburg, Russia. Phone: +7 343 341 79 40.

Lisin Ilya Vyacheslavovich – Engineer, Russian State Professional Pedagogical University, Ekaterinburg, Russia. Phone: +7 343 371 88 00.

Turlaev Valery Vasilievich – Chief Engineer, LLC Ural Diesel Engine Plant, Ekaterinburg, Russia.

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

Abstract. This article presents advantages and determines key parameters of the bimetallic strip production process at a combined continuous casting and deformation machine. A thermal design of the combined continuous casting and deformation process during production of steel-copper bimetal is given.

Keywords: steel-copper bimetal, combined process, continuous casting and deformation, thermal field, composite mould.

References

1. Kuznetsov E.V., Kobelev A.G. Bimetals: modern technologies and application. *Plasticheskaya deformatsiya staley i splavov: sb. nauch. trudov* [Plastic deformation of steel and alloys: collection of research papers]. Moscow: MISiS, 1996, pp. 296-302.
2. Kuznetsov E.V. Key guidelines of development of a bimetal production process. *Teoriya i tekhnologiya protsessov plasticheskoy deformatsii: trudy nauch.-tekhn. konferentsii* [Theory and technology of plastic deformation processes: collection of research papers]. Moscow: MISiS, 1997, pp. 111–119.
3. Lekhov O.S. A billet continuous casting method and a machine for its application. Patent RF, no. 2077407. 2000.
4. Lekhov O.S. A bimetallic strip production method. Patent RF, no. 2064364.
5. ANSYS. Structural analysis Guide. Rel.6.0. <http://www.cadfern.ru>
6. Lekhov O.S., Komratov Yu.S. *Sovmeshchennye protsessy nepre-ryvno go litya i deformatsii dlya proizvodstva prokata* [Combined continuous casting and deformation processes for rolled products]. Ekaterinburg: USTU-UPI, 2009.

ОХРАНА ТРУДА В МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 331.45:614.8:519.25

КАНОНИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ТРАВМАТИЗМА И ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Девятченко Л.Д., Соколова Э.И.

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

Аннотация. Приведены результаты канонического анализа статистических данных многомерной выборки объемом 80, включающей 3 признака массива М – человеческий фактор и 4 признака массива Т – травматизм на предприятиях черной металлургии. Получены два независимых статистически значимых решения: $\rho_{\max} = 0,463920$, $\rho = 0,394816$, характеризующие связь многомерных признаков М и Т.

Ключевые слова: производственный травматизм, человеческий фактор, канонический анализ, многомерный массив, матрица корреляции, извлеченная дисперсия.

Введение

Проблемы взаимоотношений человеческого общества и окружающей среды в обозримом будущем станут самыми острыми. Поэтому экологический подход является необходимым при решении производственных, демографических и других задач, которые связаны с деятельностью людей, с так называемым «человеческим фактором».

В настоящее время нормативная база Российской Федерации в области экологии направлена на идентификацию и оценку опасностей для человека в среде его жизнедеятельности. Для выявления и анализа рисков рекомендуются качественные и количественные методы оценки [1–3]. Качественные методы преимущественно основаны на балльной или экспертной оценке, используют для выявления причин и источников риска. Количественные методы оценивания рисков основаны на определении вероятностей возникновения происшествий, при этом учитываются прямые и косвенные потери для этих событий. В упомянутых работах [1–3] авторы методик обращают внимание на организационные, технические и социально-экономические причины травм.

Проведенная ранее работа по факторизации условий труда на основе результатов аттестации рабочих мест в цехах предприятий черной металлургии [4] позволила установить, что регрессионные модели для отдельных откликов травматизма на условия труда не в полной мере отражают все аспекты производственного травматизма. При этом авторы обратили внимание на человеческий фактор, т.к. в момент происшествия обычно фиксируется некоторое количество

индивидуальных характеристик пострадавшего. В этой связи нами предпринята попытка выявить, какова роль человеческого фактора в негативных событиях с признаками травматизма и потерь здоровья и какова степень детерминизма системы человека в производственной среде.

Для решения поставленной задачи авторы продолжили анализ данных, предпринятый ранее [4]. Однако теперь предстояло выяснить какова корреляция ρ и степень детерминации ρ^2 между человеческим фактором и производственным травматизмом.

Материалы и методы исследования

В массив «человеческий фактор» вошли следующие переменные: профессия пострадавшего, его возраст и стаж работы, время суток и день недели наступления негативного события. В массив «травматизм» – место и вид происшествия, причины, степень тяжести травм.

Для используемых категорий и их признаков введены обозначения:

- Категория М – человеческий фактор, включающий в себя признаки: М1 – временная характеристика (представлена как эффект взаимодействия дней недели (Mw), оцифрованных в последовательности 1–7, и времени суток (Mt), т.е. $M1 = Mt \cdot Mw$), М2 – профессия (ранжирована по уровням: 1 – прокатчик, 2 – металлург, 3 – обслуживающий персонал, 4 – работники горно-обогатительного производства), М3 – возрастная характеристика (определена как отношение возраста пострадавшего к его стажу работы на данном рабочем месте);

• Категория Т – травматизм, включающий в себя признаки: Т1 – причины травмы (вероятность причин возникновения несчастного случая, вычисленная суммированием вероятностей несовместных событий, – неудовлетворительная организация работ со стороны руководителей; нарушение норм, правил, инструкций; отсутствие средств коллективной защиты, неисправное оборудование, отсутствие инструкций; работа неполным штатом; ненадежный контроль со стороны персонала; неприменение средств индивидуальной защиты, применение запрещенных средств индивидуальной защиты; личная неосторожность); Т2 – место происшествия (ранжированное по уровням: 1 – на рабочем месте, 2 – в пределах цеха, 3 – вне цеха); Т3 – вид происшествия (вероятность воздействия движущихся, вращающихся, разлетающихся деталей и предметов; падения при перемещении и /или с высоты; воздействия экстремальных температур; падения предметов, обрушение, обвалы; поражения электрическим током; прочих событий); Т4 – степень тяжести травм (ранжированная по уровням: 1 – смертельные; 2 – тяжелые с увечьем; 3 – тяжелые, 4 – легкие).

Результаты первичной обработки исходных данных приведены в табл. 1 и 2.

Полный целевой анализ многомерного массива данных объемом $n=80$, объединяющего два блока данных М и Т, был выполнен в системе STATISTIKA® [5]. В основу положен метод многомерной статистики – канонический анализ [6].

Суть канонического анализа заключается в оценке корреляционной связи между обобщенными (каноническими) переменными U и V, представленными как линейные комбинации весовых коэффициентов с наборами признаков, входящих в массивы М и Т соответственно.

По определению:

$$\begin{cases} U = \sum_{j=1}^k \alpha_j M_j = \alpha^T M, \\ V = \sum_{j=1}^q \beta_j T_j = \beta^T T, \end{cases}$$

где α_j ($j = \overline{1, k}$) и β_j ($j = \overline{1, q}$) – искомые весовые коэффициенты, определяемые для поиска корреляционной связи ρ_{UV} k – признаков массива М (входных) и q – признаков массива Т (выходных); α^T , β^T – транспонированные векторы весовых коэффициентов для соответствующих U и V канонических переменных.

Таблица 1

Основные числовые характеристики используемых признаков

Категория	Среднее значение	Доверительный интервал		Минимум	Максимум	Дисперсия	Стандартное отклонение
		–95%	+95%				
M1	45,5406	36,9348	54,1464	1,190000	166,250	1495,4396	38,6709
M2	1,7875	1,5789	1,9961	1,000000	4,000	0,87832	0,9372
M3	170,3598	–21,9823	362,702	1,708738	6000,000	747027,201	864,307
T1	0,2928	0,2539	0,3316	0,080000	0,850	0,03047	0,1745
T2	1,2750	1,1632	1,3868	1,000000	3,000	0,25253	0,5025
T3	0,3242	0,2822	0,3662	0,012500	0,512	0,03567	0,1889
T4	3,0500	2,8127	3,2873	1,000000	4,000	1,13671	1,0662

Таблица 2

Корреляционная матрица

	M1	M2	M3	T1	T2	T3	T4
M1	1,00	–0,13	–0,13	0,06	–0,22	0,26	–0,07
M2	–0,13	1,00	–0,14	–0,21	–0,01	–0,28	0,07
M3	–0,13	–0,14	1,00	0,21	0,23	–0,16	–0,31
T1	0,06	–0,21	0,21	1,00	0,07	0,16	–0,04
T2	–0,22	–0,01	0,23	0,07	1,00	–0,05	–0,14
T3	0,26	–0,28	–0,16	0,16	–0,05	1,00	–0,01
T4	–0,07	0,07	–0,31	–0,04	–0,14	–0,01	1,00

В каноническом анализе связь между переменными U и V определяется как обычная парная корреляция:

$$\rho_{UV} = \frac{\text{Cov}(U, V)}{\sqrt{\text{Var}U \cdot \text{Var}V}} = \frac{a^T \Sigma_{12} \beta}{\sqrt{(a^T \Sigma_{11} a) \cdot (\beta^T \Sigma_{22} \beta)}},$$

где Σ_{11} , Σ_{22} , $\Sigma_{21} = \Sigma_{12}$ – составные части общей

корреляционной матрицы Σ , $\Sigma = \begin{pmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} \\ \Sigma_{21} & \Sigma_{22} \end{pmatrix}$;

$\text{Cov}(U, V)$ – ковариация переменных U и V ; $\text{Var}U$, $\text{Var}V$ – вариации переменных признаков U и V соответственно.

Причем для стандартизованных переменных U и V каноническая корреляция $\rho_{UV} = \alpha^T \Sigma_{12} \beta$, т.к. выполнены ограничения на вариации $\text{Var}U = \text{Var}V = 1$.

Задача поиска $\max \rho_{UV}$ при указанных ограничениях решается методом множителей Лагранжа. Функция Лагранжа данной задачи имеет вид

$$L(\alpha, \beta, \lambda, \mu) = 2\alpha^T \Sigma_{12} \beta + \lambda(1 - \alpha^T \Sigma_{11} \alpha) + \mu(1 - \beta^T \Sigma_{22} \beta),$$

где λ и μ – множители Лагранжа; α и β – искомые векторы для соответствующих линейных комбинаций U и V .

При приравнении к нулю соответствующих частных производных $\frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0$ и $\frac{\partial L}{\partial \beta} = 0$

приходим первоначально к системе уравнений $\begin{cases} \Sigma_{12} \beta - \lambda \Sigma_{11} \alpha = 0 \\ \Sigma_{21} \alpha - \mu \Sigma_{22} \beta = 0 \end{cases}$, и в силу того, что $\text{Cov}(U, V) = \text{Cov}(V, U)$ или $\alpha^T \Sigma_{12} \beta = \beta^T \Sigma_{21} \alpha$, а также с учетом принятых выше ограничений, для переменных U и V оказывается, что $\lambda = \mu$ и, следовательно, задача поиска сводится к решению системы

$$\begin{cases} -\lambda \Sigma_{11} \alpha + \Sigma_{12} \beta = 0 \\ \Sigma_{21} \alpha - \lambda \Sigma_{22} \beta = 0 \end{cases}$$

$$\text{или} \begin{pmatrix} -\lambda \Sigma_{11} & \Sigma_{12} \\ \Sigma_{21} & -\lambda \Sigma_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = 0.$$

Однако поиск корней характеристических уравнений с помощью данной системы затруднителен, т.к. матричные коэффициенты, вошедшие в данную систему, как правило, имеют неодинаковую размерность, в нашем случае $k \neq q$, где $k = 3$, $q = 4$. Поэтому в алгоритме поиска решений используется преобразованная система:

$$\begin{cases} (\Sigma_{11}^{-1} \Sigma_{12} \Sigma_{22}^{-1} \Sigma_{21} - \lambda^2 E) \alpha = 0, \\ (\Sigma_{22}^{-1} \Sigma_{21} \Sigma_{11}^{-1} \Sigma_{12} - \lambda^2 E) \beta = 0, \end{cases}$$

где E – единичные матрицы размера $k \times k$ и $q \times q$ в соответствующих уравнениях преобразованной системы. При этом определяются собственные числа λ^2 , а не λ , как это было в исходной системе.

Решением преобразованной системы матричных уравнений являются собственные числа $\lambda_i^2 > 0$, $i = \overline{1, k}$, $k = \text{rank} \Sigma_{12} = \text{rank} \Sigma_{21}$ и соответствующие им собственные векторы $\alpha^{(i)}$ и $\beta^{(i)}$, $i, j = \overline{1, k}$, размерность и координаты которых (весовые коэффициенты) определяются из уравнений преобразованной системы.

Очевидно также, что с помощью исходной системы уравнений, например из матричного уравнения $\lambda_i \Sigma_{11} \alpha^{(i)} = \Sigma_{12} \beta^{(i)}$, при умножении его слева на $(\alpha^{(i)})^T$, устанавливается смысл $\lambda_i = \rho_i$.

Результаты исследования и их обсуждение

Совокупность всех определяемых коэффициентов корреляции ρ_i , $i = 1, 2, 3$ представлена на

рис. 1. Каждый из определяемых корней $\lambda_i^2 = \rho_i^2$ был проверен на статистическую значимость, исходя из χ^2 – статистики, представленной в **табл. 3**

В **табл. 3** приведены также значения Λ – статистики, используемой в алгоритме Бартлетта для проверки значимости [7] вычисляемых λ_i^2 корней на основе χ^2 – статистики:

$$\begin{aligned} \chi^2 [(k-p)(q-p)] &= \\ &= - \left[n - 1 - p - \frac{1}{2}(k+q+1) \right] \ln \Lambda_p, \end{aligned}$$

где $p = 0, 1, 2$; $\Lambda_p = \prod_{i=p+1}^k (1 - \hat{\lambda}_i^2)$.

Сравнивая расчеты χ^2 – статистики, представленные в **табл. 3**, с критическими $\chi_{\text{таб}}^2 = \chi_{\alpha}^2$ при $\alpha = 0,05$ и заданном числе степеней свободы $(k-p)(q-p)$, для первого корня $\chi^2(12) = 33,10434 > \chi_{\text{таб}}^2(12) = 21,026$, для второго корня $\chi^2(6) = 14,92781 > \chi_{\text{таб}}^2(6) = 12,59$, а для третьего корня $\chi^2(2) = 2,21832 < \chi_{\text{таб}}^2(2) = 5,991$. Таким образом, первые два корня обладают статистической значимостью.

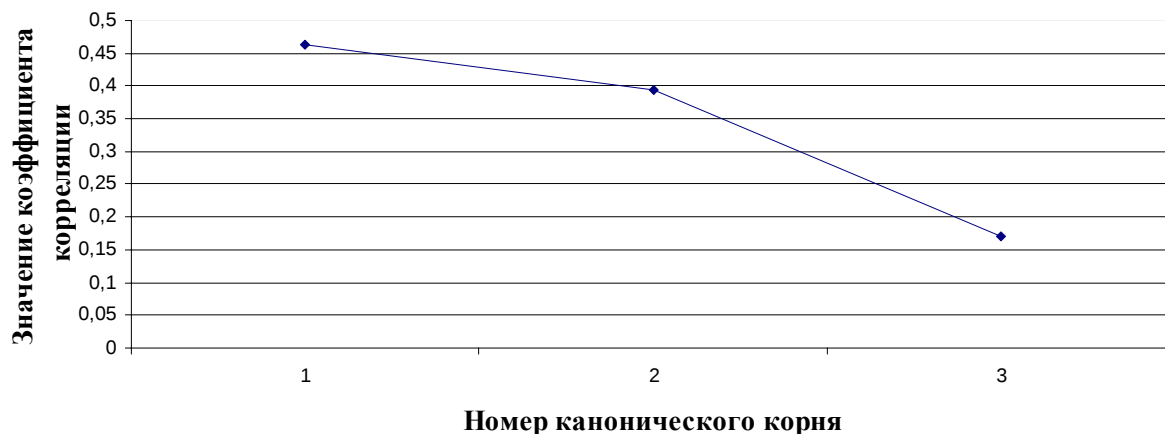


Рис. 1. Коэффициенты канонической корреляции для массивов М и Т

Таблица 3

Оценка статистической значимости определяемых корней λ_i^2 по χ^2 критерию

Номер корня	Коэффициент корреляции ρ	Квадрат коэффициента корреляции ρ^2	Значение χ^2 – статистики	Число степеней свободы	Уровень значимости α	Значение Λ – статистики
1	0,463920	0,215222	33,10434	12	0,000936	0,643141
2	0,394816	0,155879	14,92781	6	0,020846	0,819519
3	0,170717	0,029144	2,21832	2	0,329849	0,970855

В табл. 4 для всех корней (собственных чисел) представлены соответствующие им координаты собственных векторов (канонические веса).

претацию следует уточнить.

Если рассмотреть упрощенную факторную модель (без учета специфических факторов) применительно для канонических переменных $U = W_u \cdot F$ и $V = W_v \cdot F$, где W_u и W_v – векторы нагрузочных коэффициентов, F – матрица общих факторов, $F = (F_1, F_2, \dots, F_c)^T$, $c \leq k$, причем факторы, так же как и канонические переменные, выражены в стандартизованном масштабе, т.е. $M(F_j) = 0$

Таблица 4

Канонические веса признаков массивов М и Т, вычисленные для i - корней

Номер корня	M1	M2	M3	T1	T2	T3	T4
1	0,407705	-0,318713	-0,827300	-0,231588	-0,494810	0,715919	0,369796
2	-0,513518	0,603489	-0,525775	-0,586573	0,076818	-0,446642	0,589400
3	0,780894	0,759094	0,286777	-0,245713	-0,761950	-0,330682	-0,610783

Интерпретация весовых коэффициентов, вычисленных для стандартизованных переменных U и V , может быть схожа с интерпретацией коэффициентов множественной регрессии: чем больше абсолютное значение канонического веса, предписываемого признаку (регрессору), тем больше его абсолютный вклад в каноническую переменную.

Возможна также интерпретация, схожая с той, как в факторном анализе интерпретируют нагрузки: чем больше абсолютное значение канонического веса, тем больше теснота связи данной переменной (исходного признака) с канонической переменной. Однако последнюю интер-

и $D(F_j) = 1$, $j = \overline{1, c}$. Тогда ковариационные матрицы $D(U) = \Sigma_{11} \approx W_u W_u^T$, $D(V) = \Sigma_{22} \approx W_v W_v^T$. И с учетом того, что $\text{Cov}(U, V) = \Sigma_{12}$ получаем $\text{Cov}(U, V) = \text{Cov}(W_u \cdot F, W_v \cdot F) = W_u W_v^T$. При этом целесообразно предположить, что число факторов $c \leq \min[\text{rank}(W_u, W_v)]$.

Векторы факторных нагрузок W_u и W_v (факторная структура) в системе STATISTIKA® [5] вычисляются автоматически для всех определяемых корней λ_i^2 , результаты приведены в табл. 5.

Сравнивая статистические данные табл. 4 и 5, наблюдаем их идентичность по распределению канонических весов и факторных нагрузок, определяемых для обоих массивов. Распределение этих характеристик (вкладов) по убыванию их модулей следующее. Для первого корня: (М3, М1, М2) и (Т3, Т2, Т4, Т1). Для второго корня: (М2, М3, М1) и (Т4, Т1, Т3, Т2).

Таким образом, максимально возможная корреляция $\rho_1 = 0,4639$ между двумя многомерными признаками М (человеческий фактор) и Т (производственный травматизм) определяется в основном вкладами М3 (отношение возраста пострадавшего к его стажу на данном рабочем месте) и Т3 (вероятность возникновения негативного события), а другой статистически значимый уровень связи $\rho_2 = 0,3948$ обеспечивается в основном вкладами признаков М2 (профессия, ранжированная по уровням снижения опасности) и Т4 (степень тяжести травм, ранжированная по

уровням снижения потерь здоровья), а также Т1 (суммарная вероятность причин возникновения несчастного случая).

Для наглядности график канонической связи переменных $U(M)$ и $V(T)$ при $\rho_2 = 0,3948$ представлен на рис. 2.

Очевидно, что корреляционное поле (см. рис. 2) канонических переменных U_2 и V_2 «вытянуто» вдоль предполагаемой линии регрессии, $V(T) = 0,3948U(M)$. В центре этого поля имеется «сгусток» двумерных точек, «излишки» которых образуют небольшой положительный эксцесс на обеих гистограммах.

Принимая во внимания, что найденные варианты значимых решений $\rho_1 = 0,4639$ и $\rho_2 = 0,3948$ практически мало различаются, с учетом независимости этих решений можно использовать полученные канонические связи для упреждения признаков травматизма T_j , $j = \overline{1, q}$ по признакам человеческого фактора M_i , $i = \overline{1, k}$.

Таблица 5

Факторная структура для определяемых корней по массивам М и Т

Номер корня	М1	М2	М3	Т1	Т2	Т3	Т4
1	0,555750	-0,255749	-0,836344	-0,168353	-0,602020	0,698760	0,440432
2	-0,521191	0,741046	-0,542334	-0,676377	-0,029298	-0,553169	0,608139
3	0,647690	0,620840	0,080015	-0,331493	-0,675463	-0,322798	-0,486482

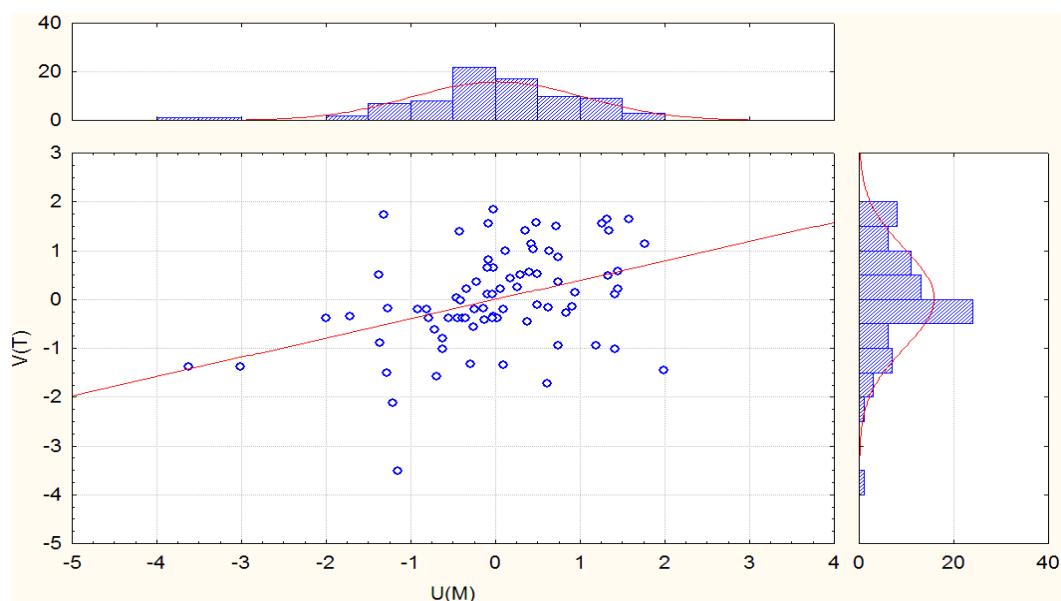


Рис. 2. Корреляционное поле канонических переменных, совмещенное с гистограммой распределения данных по ним

Далее естественно возникает вопрос, какая часть дисперсии переменной U объясняется переменной V и наоборот. Исходя из определения $\rho = \rho(\alpha^T M, \beta^T T)$ для стандартизованных значений входных M_i , $i = \overline{1, k}$ и выходных T_j , $j = \overline{1, q}$ признаков и принимая во внимание ограничение на дисперсию $\sigma_U^2 = \sigma_V^2 = 1$, это трудно установить. Действительно, если с помощью оценки коэффициента регрессии "b" выразить одну величину через другую $V = b \cdot U$, где $b = \rho \frac{\sigma_V}{\sigma_U}$, то очевидно, что нельзя установить

долю дисперсии, объясняемую значением ρ^2 , для каждой в отдельности канонической переменной в силу равенства их дисперсий. Значение ρ^2 есть доля дисперсии, общей для взвешенных сумм по обоим массивам данных M и T . Доля объясняемой дисперсии для канонических переменных в отдельности U и V определяется косвенно, с помощью коэффициентов факторной структуры ω_{ij} (факторных нагрузок). Поэтому возведенная в квадрат факторная нагрузка ω_{ij}^2 есть доля дисперсии, объясняемая каждой переменной в канонической переменной соответствующего множества. Следовательно, для каждого корня λ_i^2 можно определить среднее значение этих долей $\overline{\sigma_i^2}$ по каждой канонической переменной U_i и V_i : $\overline{\sigma^2(U_i)} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \omega_{ij}^2$ и

$$\overline{\sigma^2(V_i)} = \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \omega_{ij}^2 \text{ где } k, q - \text{число переменных в}$$

соответствующих массивах M и T ; ω_{ij}^2 – определяемые для каждого корня нагрузочные коэффициенты i -фактора ($i = \overline{1, c}$, $c \leq q$) на j -признак в соответствующей группе признаков M или T .

Теперь, если умножить значение $\rho_i^2 = \lambda_i^2$ на соответствующие доли извлеченной дисперсии отдельно по каждой группе переменных M и T , то получим так называемую меру «избыточности» одного массива данных по отношению к другому:

$$\text{Redund}(\alpha_i^T M) = \overline{\sigma^2(U^{(i)})} \cdot \lambda_i^2,$$

$$\text{Redund}(\beta_i^T T) = \overline{\sigma^2(V^{(i)})} \cdot \lambda_i^2.$$

На основании приведенных здесь формул были получены числовые характеристики, которые показывают, что массив M имеет преимущества по суммарной величине извлеченной дисперсии и суммарной мерой избыточности по сравнению с массивом данных T , что выражается в процентном соотношении как 100:77,8 и 14,28:10,85 соответственно. Это может означать, что статистические данные по производственному травматизму в большей мере подвергнуты «шумовому» эффекту по сравнению с индивидуальными данными пострадавшего.

Общие выводы

1. Взаимосвязь многомерных признаков травматизма (T) и человеческого фактора (M) наиболее полно определяется методом канонического анализа по сравнению с методом множественного регрессионного анализа.

2. Влияние 3 признаков массива M на 4 признака массива T подтверждено на уровне значимости 0,05 и получены два независимых решения $\rho_1 = 0,4639$ и $\rho_2 = 0,3948$, характеризующих два варианта связи, которые можно использовать для предупреждения травматизма.

3. Установлено также превышение информационной ценности массива M по отношению к массиву T – это отношение 100:77,8 по извлекаемой дисперсии и 14,3:10,8 по избыточности соответственно, что предполагает наличие случайных возмущений при учете и контроле совокупности признаков производственного травматизма и снижает эффективность его предупреждения.

Список литературы

1. Мастрюков Б.С. Риск в промышленной безопасности и охране труда // Безопасность жизнедеятельности. 2004. №5. С. 2–7.
2. Аронов И.З., Бобровников Г.Н. Общая методология оценки риска причинения вреда и основные модели анализа риска // Научно-технический журнал. 2008. № 2. С. 5–10.
3. Ковалевич О.Н. Система оценки риска и закон о техническом регулировании // Проблема безопасности и ЧС. 2006. №1. С. 13–23.
4. Девятченко Л.Д., Соколова Э.И. Факторизация условий труда, сопутствующих травматизму в черной металлургии // Безопасность жизнедеятельности. 2012. №9. С. 2–9.
5. Боровиков В.П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. 2-е изд. СПб.: Питер, 2003. 688 с.
6. Девятченко Л.Д. Линейная корреляция. Введение в канонический анализ. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2002. 87 с.
7. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. 3-е изд. М.: Наука, 1983. 416 с.

A CANONICAL CONNECTION BETWEEN INJURIES
AND A HUMAN FACTOR IN FERROUS METALLURGY

Devyatchenko Leonid Dmitrievich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 3519 298 524. E-mail: mgtu@mgtu.ru.

Sokolova Elvira Ildarovna – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Expert on Assessment of Working Conditions, LLC TsEAS-M, Russia. E-mail: Yudina_Elvira@mail.ru.

Abstract. This article presents results of a canonical analysis of a multivariate statistical sample of 80, including 3 features of an M array – the human factor and 4 features of a T array – injuries at enterprises of ferrous metallurgy. There were obtained two independent statistically significant decisions: $\rho_{\max} = 0,463920$, $\rho = 0,394816$, characterizing the connection between multidimensional features M and T.

Keywords: industrial injuries, human factor, canonical analysis, multidimensional array, correlation matrix, variance extracted.

References

1. Mastryukov B.S. Risk in industrial safety and labor protection. *Life Safety*, 2004, no. 5, pp. 2–7.
2. Aronov I.Z., Bobrovnikov G.N. The general methodology for damage risk assessment and key models of risk analysis. *Scientific and technical journal*, 2008, no. 2, pp. 5–10.
3. Kovalevich O.N. A risk assessment system and the law on technical regulation. *Safety and emergencies*, 2006, no. 1, pp. 13–23.
4. Devyatchenko L.D., Sokolova E.I. A factor analysis of working conditions related to injuries in ferrous metallurgy. *Life Safety*, 2012, no. 9, pp. 2–9.
5. Borovikov V.P. *STATISTICA. Iskustvo analiza dannykh na kompyutere: Dlya professionalov* [STATISTICA. The art of data analysis on a computer: For professionals]. 2nd ed. Saint Petersburg: Piter, 2003, 688 p.
6. Devyatchenko L.D. *Lineynaya korrelyatsiya. Vvedenie v kanonichesky analiz*. [Linear correlation. Introduction to the canonical analysis]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2002, 87 p.
7. Bolshev L.N., Smirnov N.V. *Tablitsy matematicheskoy statistiki* [Tables of Mathematical Statistics]. 3rd ed. Moscow: Nauka, 1983, 416 p.

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ОБУЧЕНИЯ И ВОСПИТАНИЯ

УДК 504.06

ИНТЕГРАЦИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО И ТЕХНИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ КАК УСЛОВИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО СТАНОВЛЕНИЯ ВЫПУСКНИКА ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗА

Черчинцев В.Д.¹, Нефедова Е.В.²

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

² Новотроицкий филиал НИТУ МИСиС, Россия

Аннотация. В статье представлена модель интеграции экологического и технического образования в гуманитарной образовательной среде вуза. Выявлены направления интеграции: интеллектуально-нравственное, научно-исследовательское, социальное. Обосновано применение форм разворачивания дидактической ситуации во времени: от единичных образовательных мероприятий до работы студенческих научных обществ и создания общественной экологической организации. На основании требований государственного стандарта доказана эффективность апробируемой модели в образовательной среде технического вуза.

Ключевые слова: профессиональные компетенции, экологическое воспитание, интеграция, общественная организация, техническое образование.

Введение

Модернизация высшего образования и связанное с этим введение Федеральных государственных образовательных стандартов в Российской системе высшего образования потребовало переосмысления системы подготовки выпускников металлургического вуза. На сегодняшний день основной целью профессионального образования является подготовка квалифицированного работника соответствующего уровня и профиля, конкурентоспособного на рынке труда, компетентного, ответственного, свободно владеющего своей профессией и ориентированного в смежных областях деятельности, способного к эффективной работе по специальности на уровне мировых стандартов, готового к постоянному профессиональному росту, социальной и профессиональной мобильности [1].

Профессиональное становление выпускника технического вуза невозможно без формирования экологической культуры личности. Экология как форма мировоззрения охватывает сегодня все сферы жизнедеятельности человека, в том числе и инженерную деятельность [2]. Очевидно, что дефицит экологического образования приводит ко многим непоправимым ошибкам в

сфере производства. Проблема экологического образования будущих инженеров актуализируется и в связи с тем, что в утвержденных Минобрнаукой РФ в 2009–2010 гг. образовательных стандартах по многим специальностям отсутствуют смежные с дисциплиной «Экология» учебные курсы, формирующие естественнонаучные и гуманитарно-правовые основы экологического мышления. В итоге выпускники технических вузов, будущие специалисты в отраслевой экологии (металлургия, химия, теплоэнергетика, электроэнергетика, машиностроение) не получают в рамках учебных программ университетов достаточной гуманитарной подготовки, необходимой для принятия организационно-управленческих решений в реальной практике производства и хозяйственной деятельности [3, 4].

Данные противоречия лежат в основе **проблемы** теоретико-методического обоснования педагогических условий профессионального становления выпускника вуза.

Цель работы: разработать модель интеграции экологического и технического образования в гуманитарной образовательной среде технического вуза, обеспечивающую профессиональное становление выпускника, аналогичную модели, представленной в работах О. В. Лешер и ее учеников [2].

Интеграция экологического и технического образования в содержании высшего образования обусловлена интегральной сущностью самой экологии. Экология – наука, объединяющая многие отрасли знания, которую условно можно разделить на два аспекта: технический и гуманитарный (см. **рисунок**). Технический аспект экологии включает в себя знания и опыт человечества о ресурсосберегающих технологиях, технике

защиты окружающей среды от загрязнений, знания технологических требований и показателей производства, понимание экологического паспорта предприятия. Гуманитарный аспект экологии содержит экологическое право, экологию личности, экологическую этику и понимание Концепции устойчивого развития, принципов рационального природопользования и знание основ экономики природопользования.



Модель интеграции экологического и технического образования в гуманитарной среде вуза

Понятно, что с уменьшением доли аудиторной нагрузки невозможно включить в содержание специальных технических дисциплин объем обозначенных выше знаний (даже в их техническом разрезе). В то же время дисциплина «Экология», включенная в учебный план одного семестра на первом курсе, не может охватить весь спектр необходимых тем. Но более важно то, что первокурсник не способен еще к личностному осознанию значимости экологических знаний для своей будущей профессиональной деятельности. Таким образом, не может быть и речи о выработке профессиональных компетенций студента. На старших курсах, при подготовке курсовых научно-исследовательских и выпускных квалификационных работ студенты сталкиваются с необходимостью экологического обоснования своих технологических решений и испытывают недостаток экологического образования.

Итак, интеграция технического и экологического образования необходима и продиктована требованиями времени, но она практически неосуществима ввиду уменьшения доли аудиторных занятий и сложности технического образования. Следовательно, необходимы такие формы и направления интеграции, которые могут быть реализованы во время внеаудиторных занятий и за рамками программ образовательных дисциплин в высших учебных заведениях.

В период с 2007/2008 учебного года по настоящее время в Новотроицком филиале НИТУ «МИСиС» реализуется Концепция экологического воспитания (Концепция). Некоторые результаты этой деятельности могут представлять интерес для широкого круга преподавателей технических вузов [5].

Традиционно сложились **направления** реализации Концепции (см. **рисунок**):

- интеллектуально-нравственное;
- научно-исследовательское;
- социальное.

Интеллектуально-нравственное направление работы включает в себя организацию и проведение экскурсий, встреч со специалистами, круглых столов по актуальным экологическим проблемам. За годы работы в филиале сформировалась гуманитарная образовательная среда, в которую вошли не только студенты, преподаватели, администрация филиала, сотрудники лабораторий и библиотек, но и специалисты экологических служб города и промышленных предприятий.

Гуманитарная образовательная среда характеризуется гуманитаризацией естественнонаучного образования, ценностно-смысловым согласованием деятельности всех субъектов образовательного процесса, вариативностью программ обучения, духовно-нравственной атмосферой общения [5].

Традиционными стали открытые лекции ведущих специалистов по охране окружающей среды промышленных предприятий, в частности ОАО «Уральская Сталь». На конкретных примерах работы этих предприятий они показывают, как производятся расчеты платы за выбросы загрязняющих веществ, за складирование отходов, знакомят студентов с экологической политикой предприятий. Такие встречи позволяют наглядно продемонстрировать неразрывную связь экономики, экологии и технологии в металлургическом производстве.

Благодаря многолетней продуктивной совместной работе с преподавателями МГТУ им. Г.И. Носова студенты филиала имеют возможность сравнивать технологические решения на предприятиях ОАО «Уральская Сталь» и ОАО «ММК». Знакомство с актуальными вопросами технических основ модернизации металлургического производства и охраны окружающей среды на предприятии проводится на основе изучения опыта передовых исследований в этой области. В ходе тематических круглых столов и семинаров студентами были изучены: очистка промышленных газов, пылеулавливание и пылеподавление, переработка техногенных продуктов и отходов металлургического производства с целью извлечения ценных компонентов [7, 8].

Немаловажным фактором становления специалиста-металлурга является здоровье студента, поэтому особое внимание уделяется организации круглых столов со специалистами-медиками по вопросам здорового образа жизни и профилактики заболеваний. Такие мероприятия стали ежегодными, тематика встреч формируется, исходя из социологических опросов студентов и сотрудников вузов.

Научно-исследовательское направление деятельности студентов включает: разработку тем и презентацию докладов по актуальным проблемам экологии города и металлургического производства на ежегодной научно-практической конференции НФ НИТУ «МИСиС» с последующей публикацией докладов в сборнике «Наука и производство Урала»; уча-

стие студентов в конференциях, форумах и олимпиадах регионального и всероссийского уровня; апробацию методик использования нового лабораторного оборудования в лабораториях филиала.

Результатом разработки тем являются статьи в сборниках «Наука и производство Урала». Только за период с 2012 по 2014 годы опубликовано 15 студенческих статей по экологической тематике, в частности:

- изучение зависимости теплоты растворения кристаллических веществ от их строения;
- сравнение эффективности методов очистки питьевой воды;
- анализ воды на содержание ионов алюминия;
- анализ почв на содержание солей тяжелых металлов;
- определение актуальной и гидролитической кислотности почв методами потенциометрического и комплексонометрического титрования.

Студентами освоена методика работы с фотокалориметром, сахариметром, учебно-лабораторным комплексом (УЛК) «Химия» и модулями «Термостат» и «Электрохимия», рН-метром, ионометром, переносными экологическими лабораториями. Практика использования этих приборов, а также отработанные методики сейчас широко применяются в учебном процессе на занятиях по дисциплинам «Экология», «Физическая химия», «Методы контроля и анализа вещества».

Важным фактором научно-исследовательской деятельности студентов является интеграция образовательного потенциала вуза и ОАО «Уральская Сталь». Дирекция по персоналу помогает организовывать экскурсии в цеха и лаборатории предприятия. Ежегодно студенты посещают лабораторию мониторинга состояния окружающей среды, лабораторию экспресс-анализа стали, лабораторию коксохимического производства (КХП), очистные сооружения КХП. В условиях производственных лабораторий студенты получают возможность ознакомиться с новейшим оборудованием для спектрального анализа, увидеть организацию системы аналитического контроля на производстве, почувствовать важность исследовательского подхода в эффективной работе предприятия.

В ходе совместной работы этого подразделения вуза и ОАО «Уральская Сталь» в 2012 году

прошла специализация студентов на КХП, в результате которой были проведены исследования:

- анализ каменноугольной смолы как вторичного ресурса КХП;
- корреляция свойства шихты и качества кокса;
- изучение особенностей одноилловой очистки сточных вод КХП;
- разработка программного продукта для удобного хранения аналитической информации в лаборатории КХП.

Результаты исследований были доложены на межрегиональной научно-технической конференции МГТУ им. Г.И. Носова. На протяжении последних трех лет студенты филиала имеют возможность участвовать в работе конференции МГТУ, обсуждать свои доклады и выслушивать сообщения ученых по актуальным экологическим проблемам промышленного региона и металлургического предприятия. Выход за рамки своего образовательного учреждения, непосредственное рабочее общение с учеными и производственниками другого региона, несомненно, обогащают личность студента и способствуют осознанию необходимости интеграции технических и экологических знаний в профессиональной деятельности инженера [9].

В последние годы студентами, преподавателями и администрацией филиала была осознана необходимость открытия еще одного направления работы – **социального**. Целью работы направления является становление экологической культуры личности. Этот процесс непрерывный и субъективный.

Социальную направленность приобретают и научно-исследовательские работы студентов. Результаты этих исследований подтверждаются конкретными делами и практическими результатами. На сегодняшний день открыты исследовательские группы по темам:

- сбор и утилизация пластиковых отходов на территории промышленного города;
- внедрение энергосберегающих технологий в быту;
- проект сбора и утилизации отработанных машинных масел на территории, прилегающей к санитарно-защитной зоне промышленного предприятия.

В ходе реализации Концепции претерпели изменение формы разворачивания дидактической ситуации во времени (см. **рисунок**). В 2013

году назрела потребность в создании и регистрации общественной организации «Инженерные экологические решения» (сокращенно «ИнЭР»). Цели «ИнЭР»:

- содействие становлению экологической культуры граждан, проживающих в промышленных регионах;

- содействие улучшению качества жизненной среды города за счет продвижения экологически обоснованных решений.

Организация создана и действует в соответствии с Конституцией Российской Федерации, Гражданским кодексом Российской Федерации, Федеральным законом «Об общественных объединениях». На сегодняшний день организация насчитывает 84 участника, среди которых студенты 1–4 курсов филиала, магистранты и аспиранты, студенты факультета заочного обучения, выпускники филиала. «ИнЭР» имеет свой устав и зарегистрирована в комитете по делам молодежи городской администрации [10].

Одна из важных и первоочередных задач – создание и обновление сайта «ИнЭР», регистрация в социальных сетях. Это позволит проводить среди молодежи города просветительскую работу, конкурсы фотографий и роликов, анимации на экологическую тематику, форумы по актуальным экологическим вопросам, в том числе форумы с привлечением специалистов по инженерной экологии, экологии промышленных комплексов и здоровому образу жизни.

Можно сделать вывод, что внеаудиторная работа, направленная на интеграцию экологического и технического образования студента, дает результаты.

Следует отметить, что целенаправленная работа студентов над какой-либо экологической проблемой мобилизует интеллектуальные силы студента и раскрывает его способности в полной мере.

Заключение

Модернизация высшего образования, переход на стандарты нового поколения поставили перед педагогами задачу поиска таких форм и методов работы, которые бы позволили при уменьшении доли аудиторных занятий, сформировать профессионально значимые качества выпускника.

Результаты деятельности студентов и выпускников позволяют утверждать, что интеграция экологического и технического образо-

вания способствует формированию как профессиональных, так и общекультурных компетенций выпускника технического вуза, среди которых следующие: применять в практической деятельности принципы рационального использования природных ресурсов и защиты окружающей среды; уметь оценивать риски и определять меры по обеспечению безопасности технологических процессов; анализировать влияние производственных выбросов (их состав, количество) на окружающую среду и разрабатывать мероприятия по её защите; обобщать и анализировать информацию, ставить цель и выбирать пути ее достижения; самостоятельно приобретать новые знания, используя современные образовательные и информационные технологии; работать в команде, руководить людьми и подчиняться; оформлять, представлять и докладывать результаты выполненной работы [11].

Список литературы

1. Концепция развития образования РФ до 2020 года [Электронный ресурс]. URL: <http://www.edu.ru/> (дата обращения: 10.05.2014).
2. Лешер О. В., Сергеева Е. В. Модель развития математической компетентности студентов технических вузов в процессе математической подготовки // Вестник ЧГПУ. 2010. С. 101–110.
3. Васильев А.В. Всероссийская олимпиада – форма развития научной деятельности и творческого мышления студентов и аспирантов в области природопользования // Экология и промышленность России. 2013. № 3. С. 67–68.
4. Карманова С.В. Формирование экологического мировоззрения путем внедрения программы «Зеленый офис» // Экология и промышленность России. 2013. № 12. С. 62–66.
5. Нефедова Е. В. Становление экологической культуры студента вуза // ЕЛПИТ. Самара; Тольятти, 2011. Т. 3. С. 135–140.
6. Воронцова В.Г. Постдипломное образование педагога: гуманитарно-экологический подход: автореф. дис. ... д-ра пед. наук. СПб., 1997.
7. Черчинцев В.Д., Гусев А.М. Совершенствование системы аспиранции подбункерных помещений доменного цеха ОАО «ММК» // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Магнитогорск, 2012. Т. 1. С. 176–178.
8. Черчинцев В.Д. Выбор и расчет оборудования газоочистки. Магнитогорск, 1990. 23 с.
9. Нефедова Е.В., Рачков И.А. Изучение экологических аспектов переработки отходов металлургического производства // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Магнитогорск, 2013. Т. 1. С. 117–119.
10. Федеральный закон от 19.05.1995 N 82-ФЗ (ред. от 20.07.2012) «Об общественных объединениях» / Информационно-правовой портал ГАРАНТ [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/10164186/> (дата обращения: 30.05.2014).
11. ФГОС ВПО по направлениям бакалавриата Металлургия, Машиностроение и Материалобработка [Электронный ресурс]. URL: <http://fgosvo.ru/fgosvpo/7/6/1/15> (дата обращения: 30.05.2014).

INTEGRATION OF ENVIRONMENTAL AND TECHNICAL EDUCATION AS A CONDITION OF PROFESSIONAL DEVELOPMENT OF TECHNICAL UNIVERSITY GRADUATES

Cherchintsev Vyacheslav Dmitrievich – D.Sc. (Eng.), Professor, Honorary Figure of Russian Higher Education, Head of the Department of Industrial Ecology and Life Safety, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: eco_safe@magtu.ru.

Nefedova Evgeniya Viktorovna – Ph.D. (Education), Associate Professor, Novotroitsk branch of the National University of Science and Technology MISiS, Russia. E-mail: russkisever@rambler.ru.

Abstract. This article presents a model for integrating environmental and technical education in humanitarian educational environment of the university. There were identified areas of integration: intellectual and moral, research, and social areas. This paper justifies application of forms of a didactic situation unfolding in time: from single educational activities to student research communities and a public environmental organization. Based on requirements of the state standard, efficiency of a model piloted in the educational environment of a technical university was proved.

Keywords: professional competence, environmental education, integration, public association, technical education.

References

1. Education Development Concept of the Russian Federation until 2020 [electronic resource] URL: <http://www.edu.ru/> (accessed on 10.05.2014).
2. Leshner O. V., Sergeeva E. V. A model of development of mathematical competence of technical university students during teaching mathematics. *Vestnik ChGPU*. 2010, pp. 101–110.
3. Vasiliev A.V. The National Olympiad is a form of development of scientific activities and creative thinking of students and postgraduate students in the field of nature management. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2013, no. 3, pp. 67–68.
4. Karmanova S.V. Formation of an ecological world view by introducing the program "Green Office". *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2013, no. 12, pp. 62–66.
5. Nefedova E.V. *Stanovleniye ekologicheskoy kultura studenta vuza* [Formation of ecological culture of the university student]. *ELPIT*. Samara; Tolyatti, 2011, vol. 3, pp. 135–140.
6. Vorontsova V.G. *Postgraduate education of a teacher: a humanitarian and axiological approach*. An extended abstract of a doctoral dissertation on education. St. Petersburg, 1997.
7. Cherchintsev V.D., Gusev A.M. *Sovershenstvovanie systemy aspiratsii podbunkernykh pomeshchenii domennogo tsekhha OAO "MMK"* [Improving the stock house cleaning system at the blast furnace shop of OJSC MMK]. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Current problems of modern science, technology and education]. Magnitogorsk, 2012, vol. 1, pp. 176–178.
8. Cherchintsev V.D. *Vybor i raschet oborudovaniya gazoochistki* [Selection and calculation of gas cleaning equipment]. Magnitogorsk, 1990, 23 p.
9. Nefedova E.V., Rachkov I.A. *Izuchenie ekologicheskikh aspektov pererabotki otkhodov metallurgicheskogo proizvodstva*. [Study of environmental aspects of metallurgical waste processing]. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Current problems of modern science, technology and education]. Magnitogorsk, 2013, vol. 1, pp. 117–119.
10. Federal Law No. 82-FZ dated 19.05.1995 (as amended on 20.07.2012) "On Public Associations" / GARANT informational and legal portal [electronic resource]. URL: <http://base.garant.ru/10164186/> (accessed on 30.05.2014).
11. FSES HPE on the Bachelor's Degree in Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing [electronic resource]. URL: <http://fgosvo.ru/fgosvpo/7/6/1/15> (accessed on 30.05.2014).

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 621.74

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ И МЕТАЛЛОВЕДЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ

Колокольников В.М., Петрученко Е.В.

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

Аннотация. В статье приведен анализ научно-исследовательских работ в области получения отливок из белых легированных чугунов с требуемым комплексом механических, физико-механических и специальных свойств. Показано, что работы, как правило, направлены на разработку технологий управления процессами формирования необходимой макро- и микроструктуры сплавов через выбор оптимального состава, подготовку расплава к заливке в формы (выплавка, рафинирование, модифицирование, температура заливки, высокотемпературная обработка расплава), скорость кристаллизации при формировании первичной литой структуры и вторичной фазовой перекристаллизации при термической обработке.

Ключевые слова: белые чугуны, легирующий комплекс, скорость охлаждения, модифицирование, рафинирование, термовременная обработка расплава, термическая обработка, структура, механические свойства, износостойкость, жаростойкость.

Введение

Основным массовым процессом изготовления изделий, без которых не может обойтись современная промышленность, является чугунное литье. Литье из чугуна охватило все области металлургии, машиностроения, строительства, автомобилестроения, электрооборудования.

Надежность машин, механизмов и конструкций в значительной степени зависят от качества и функциональных свойств отливок. Технология изготовления литых изделий разрабатывается исходя из определенных требований к качеству.

Белые легированные чугуны широко используют как материал для инструмента и деталей машин и механизмов, подвергающихся интенсивному изнашиванию и окислению. Современные белые чугуны – сложнелегированные многокомпонентные сплавы, различные по структуре и специальным свойствам. Они представляют собой отдельную группу промышленных чугунов, при затвердевании которых формируется композиционная структура. Именно она определяет специфические свойства белых чугунов в литом состоянии.

Несмотря на обилие литературных данных [1–15], до сих пор актуальны исследования по изучению влияния легирующих элементов и условий охлаждения на процессы кристаллизации и структурообразования, механические и эксплуатационные (жаростойкость, износостойкость, коррозионностойкость и др.) свойства этих чугунов. Особенно

это касается условий формирования различных эвтектик и карбидной фазы, металлической матрицы при наличии в составе чугуна нескольких легирующих элементов и модификаторов.

В многочисленных работах [6, 8, 16–25, 83] показано, что для производства литых изделий из белых чугунов с повышенными функциональными свойствами необходимо обеспечить комплекс мероприятий, к которым относятся подготовка шихтовых материалов и качественного расплава, обработка его рафинирующе-модифицирующими материалами, выбор легирующего комплекса, термовременная обработка расплава. На формирование структуры литых изделий (параметры карбидной фазы и металлической основы чугунов) влияют условия охлаждения при затвердевании и последующая термическая обработка.

1. Металлургические аспекты производства литых изделий из белых чугунов

Свойства литых изделий из легированных белых чугунов определяются структурой металлической матрицы и карбидной фазой. Отрицательное влияние на свойства оказывает наличие в структуре первичных карбидов. В работах [1, 22, 26–32] установлено, что одним из источников первичных заэвтектических карбидов в хромистых чугунах является высокоуглеродистый феррохром, используемый для выплавки высокохромистых чугунов. Поступающие в расплав из такой шихты крупные карбиды хрома не успевают пол-

ностью раствориться в процессе плавки чугуна и остаются в структуре после затвердевания сплава. Исследования влияния различных марок феррохрома на структуру и износостойкость высоколегированного чугуна показали целесообразность использования при выплавке высокохромистых чугунов низкоуглеродистых марок феррохрома. Свойства такого чугуна выше по сравнению с чугуном, выплавленным на феррохроме с более высоким содержанием углерода.

На микрофотографиях (рис. 1) хорошо видно различие в строении и форме карбидной фазы (особенно эвтектических первичных карбидов) у чугунов, выплавленных с применением только высокоуглеродистого феррохрома марки ФХ800, низкоуглеродистого марки ФХ025 и феррохрома двух марок ФХ800 и ФХ025.

Для улучшения структуры и свойств отливок авторами рекомендованы термовременные режимы обработки расплава при использовании в шихте для плавки различных марок феррохрома.

Немаловажным фактором в формировании структуры и свойств отливок является температура заливки чугуна в формы. В работах [22, 26] определены рациональные температурные интервалы заливки чугуна в формы, позволяющие предотвратить появление зоны столбчатых кристаллитов, нежелательной морфологии карбидов, образованию пригара, в ряде случаев трудноудаляемого, и трещин.

Скорость охлаждения – наиболее существенный фактор, определяющий характеристики первичной литой структуры белых износостойких чугунов. Определяя переохлаждение, при котором начинается кристаллизация, скорость охлаждения отливки меняет кристаллизационные параметры – скорость образования центров и линейную скорость роста кристаллов. Скорость охлаждения отливки определяется главным образом приведенной толщиной отливки, типом литейной формы, температурой заливки и неодинакова на поверхности и в центре отливки, особенно массивной. Номенклатура отливок из износостойких высокохромистых чугунов по

массе и толщине стенок достаточно широка. Соответственно широк и диапазон скоростей охлаждения реальных отливок в интервале кристаллизации. По данным [6, 33–35] он составляет 0,5–200°С/мин. Вследствие этого могут существенно меняться структура и свойства одного и того же состава чугуна при изготовлении из него отливок различных конфигураций, массы, толщины стенки. Знание характера изменения этих свойств позволяет управлять конечной литой структурой сплавов и прогнозировать их свойства.

В работах [22, 26] изучено влияние толщины стенки отливок из чугунов различных марок, залитых в песчано-глинистые формы и чугунные кокили.

Показано, что увеличение толщины стенки отливки (снижение скорости охлаждения) приводит не только к укрупнению карбидов, но и к увеличению дендритов первичного аустенита и расстояния между карбидами в эвтектике. Это снижает свойства чугунов.

При анализе изменения свойств в зависимости от скорости охлаждения было установлено, что для небольших толщин отливок (до 30 мм) разница в свойствах и структуре невелика как для песчано-глинистых форм, так и для кокиля. При толщине отливки 10 мм и в том, и другом случае структура представляет собой мартенситную или мартенситно-трооститную матрицу с дисперсными карбидами M_7C_3 и MC . Увеличение толщины стенки приводит к снижению скорости охлаждения отливки и изменению строения металлической матрицы и карбидов, что особенно характерно при литье в песчано-глинистые формы. В структуре появляется остаточный аустенит, и его доля тем больше, чем массивнее отливка. Укрупняются, причем резко при толщине стенки 50 и более миллиметров, карбиды, переходя в веерообразную форму. Образуются участки оголенной матрицы. Износостойкость снижается. Рельеф поверхности износа – неравномерный, с рисками различной глубины, длины, ширины и ямками вследствие выкрашивания крупных карбидов.

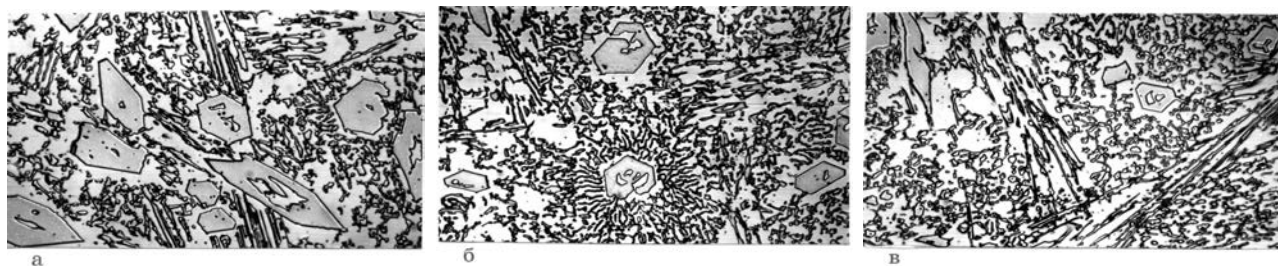


Рис. 1. Микроструктура чугуна ИЧ280Х25ГНТД, выплавленного с применением феррохрома различных марок: а – ФХ800; б – ФХ800 + ФХ025; в – ФХ025

Кроме этого, для отливок с толщиной стенки более 50 мм характерно существенное различие в дисперсности литой структуры на поверхности и в центре, где структура более грубая. Но это менее заметно сказывается на износостойкости, так как интенсивному износу подвергаются поверхностные слои отливок.

Таким образом, обобщив полученные данные, авторы отметили, что влияние скорости охлаждения на абразивную износостойкость исследованных чугунов проявляется в основном через дисперсность литой структуры и возможность получения закалочных структур непосредственно после литья. Это оказалось возможным в результате правильно выбранного химического состава сплавов, в котором эффективно использованы возможности каждого из легирующих элементов для формирования необходимой структуры.

В работах [3, 4, 10, 20, 22, 23, 36–46] показано, что наибольшего повышения функциональных свойств литых изделий можно добиться путем комплексного модифицирования расплава активными элементами, причем желательно, чтобы они имели различный механизм воздействия на расплав, т.е. были инокуляторами, ингибиторами и инверсорами.

Зависимость жароизносостойкости чугунов от количества вводимых кальция-стронциевого карбоната, силикокальция, ферробора и лигатуры БФТ-1 носит ярко выраженный экстремальный характер с максимумом при строго определенном количестве вводимой добавки. Количество вводимого карбоната, при котором жароизносостойкость чугунов максимальна: для ИЧ220Х18Г4НТ и ИЧ270Х24НТБР составляет 5 кг/т, для ИЧХ28Н2 – 6 кг/т. Количество вводимого бора для ИЧ220Х18Г4НТ составляет 0,02%, для ИЧХ28Н2 0,01%. Максимальные показатели свойств чугуна ИЧ220Х18Г4НТ при добавлении силикокальция СК20 соответствуют количеству добавки 6,6 кг/т. Количество БФТ-1, при котором свойства ИЧХ28Н2 наибольшие, составляет 5 кг/т.

Обработка расплава чугуна ИЧХ28Н2 одновременно (Ca,Sr)CO₃ и БФТ-1 в количествах 3 и 4 кг/т соответственно существенно улучшает жаростойкость и износостойкость, чем при раздельном их использовании.

Термовременная обработка способствует измельчению карбидов, что приводит к повышению абразивной и ударно-абразивной износостойкости чугунов, при незначительном понижении жаростойкости. Одновременному повышению всех специальных свойств ТВО не способствует.

Установлено [41, 42] взаимное влияние теплоаккумулирующей способности формы и температуры выдержки расплава при ТВО на структуру и свойства чугуна. С повышением теплоаккумулирующей способности формы повышается

степень влияния температуры выдержки. Наибольшее влияние температура выдержки оказывает на расплавы, залитые в кокиль, где происходит значительное увеличение доли карбидов площадью менее 10 мкм² и уменьшение доли крупных карбидов площадью более 20 мкм².

Совместное влияние ТВО и (Ca,Sr)CO₃ с БФТ-1 на расплав ИЧХ28Н2 обеспечило повышение всех показателей свойств. Наибольший показатель абразивной износостойкости соответствует температуре выдержки чугуна при 1470°C, а ударно-абразивной – при температуре 1420°C. Причем показатели ударно-абразивной износостойкости снизились по сравнению с показателями, полученными при воздействии на чугун только ТВО. Жаростойкость также повысилась, и наибольшим показателям окислительной стойкости и роста устойчивости образцов соответствуют температуры выдержки расплава 1420–1470°C.

Применение ТВО и разработанного комплекса ((Ca,Sr)CO₃ и БФТ-1) как раздельно, так и совместно улучшает комплекс литейных свойств чугунов: увеличивает жидкотекучесть, снижает линейную (свободную и затрудненную) усадку и замедляет интенсивность развития усадки в начальный момент; повышает трещиностойкость чугуна.

2. Металловедческие основы повышения эксплуатационных свойств литых изделий из КЛБЧ

Получение чугуна с соответствующим комплексом механических и специальных свойств заключается в правильном выборе его химического состава. Для выбора содержания углерода и легирующего комплекса необходимо знать влияние как отдельного элемента, так и совместное с другими элементами на формирование структуры и свойств отливок в различных условиях охлаждения при затвердевании и термической обработке.

Одним из важнейших факторов, определяющих сопротивление отливок из белых легированных чугунов изнашиванию, агрессивным средам и высоким температурам, является их структурное состояние. Для различных видов эксплуатации оптимальные функциональные свойства создаются при различных, но характерных для каждого случая, структурных состояниях сплавов [1–3, 5–8, 19, 24, 34,35].

Авторами [4, 10, 22, 23, 36, 37, 47, 48] установлены закономерности влияния химического состава, температурных режимов охлаждения металла в литейной форме на структуру металлической основы, карбидной фазы, морфологию, химический состав эвтектических композиций, механические свойства, износостойкость и жаростойкость КЛБЧ различных систем легирования.

По результатам исследования химического и

фазового состава, скорости охлаждения определены виды эвтектик (двойная аустенитно-ванадиево-карбидная ($\gamma + VC$) и тройная ледебуритоподобная ($\gamma + Fe_3C + VC$)) и основные типы структур, формирующиеся в сплавах системы Fe-V-C: структура, состоящая из дендритов аустенита (или продуктов его распада) и тройной эвтектики $\gamma + Fe_3C + VC$ (рис. 2, а, б); полностью инвертированная структура эвтектики $\gamma + VC$ (рис. 2, г, д); структура, состоящая из двух эвтектик $\gamma + VC$ и $\gamma + Fe_3C + VC$ (рис. 2, в, е). Установлены составы сплавов (7% V и 2,0–2,5% C), обеспечивающие образование композиционной полностью инвертированной структуры ванадиевых чугунов при охлаждении в сухой ПГФ. При увеличении скорости охлаждения (литье в кокиль) при одном и том же составе сплава количество ледебурита уменьшается, также происходит снижение критической концентрации ванадия при сохранении инвертированной структуры эвтектики (от 7 до 5% V). При таком соотношении ванадия и углерода резко уменьшается количество карбидов κ в структуре (до 10%). В результате этого существенно снижается относительная износостойкость в различных условиях абразивного изнашивания [49–53].

Определены концентрационные интервалы (базовый состав сплава) по углероду и ванадию (2,6–3,0% C и 5,0–8,0% V), обеспечивающие максимальную износостойкость ванадиевых чугунов в различных условиях абразивного изнашивания. Одновременно достичь достаточно высокой износостойкости и полностью инвертированной структуры белых чугунов невозможно при легировании одним ванадием вследствие неполной инверсии эвтектики и формирования перлитной структуры металлической основы.

В работах [4, 10, 23, 36, 37, 54] установлено, что дополнительное легирование ванадиевых чугунов Ti, Cu, B и увеличение скорости охлаждения при затвердевании (заливка в кокиль) значительно сокращает (вплоть до исчезновения) количество ледебурита, увеличивает объемную долю карбидов VC и $(Ti, V)C$ (в 2–3 раза). Структура металлической основы изменяется от перлитной (ПГФ) до мартенситно-аустенитной (кокиль) (рис. 3). Вследствие этого износостойкость комплексно-легированных чугунов повышается в 1,5–2,0 раза по периклазу и 2–4 раза по корунду. В зависимости от условий охлаждения в форме изменяются концентрационные интервалы C, V, Ti, Cu, B, обеспечивающие одинаковый уровень механических свойств и износостойкости.

В зависимости от химического состава в сплавах систем Fe-V-C и Fe-V-C-Cu-Ti-B формируются следующие типы структур сплавов: доэвтектическая, состоящая из дендритов аустенита (или продуктов его распада) и двойной эвтектики

$\gamma + VC$; полностью инвертированная структура эвтектики $\gamma + VC$; структура, состоящая из двух эвтектик $\gamma + VC$ и $\gamma + Fe_3C + VC$; структура, состоящая из избыточных карбидов VC и двух эвтектик $\gamma + VC$ и $\gamma + Fe_3C + VC$.

Структура металлической основы чугунов определяется химическим составом и условиями охлаждения – перлит различной дисперсности; трооститно-мартенситная; бейнитно-мартенситная и мартенситно-аустенитная. Форма избыточных карбидов VC – дендритная, «трефы» и др.

В работах [4, 10, 23, 36, 37] рассмотрено влияние химического состава и условий охлаждения при затвердевании на особенности формирования структуры и свойств чугунов с базовой композицией Fe-C-Cr-V. Авторами [23, 37, 53–64] исследованы сплавы с следующим содержанием элементов, масс. %: углерод – 2,6–3,0; ванадий – 5,0–8,0; медь – 0,8–1,2; титан – 0,3–0,6; бор – 0,01–0,05. Установлено, что фазовый состав хромованадиевых чугунов в литом состоянии представляет собой α -фазу (мартенсит), γ -фазу (аустенит), карбид ванадия (VC), карбид хрома $(Fe, Cr, V)_7C_3$. Сочетание этих фаз дает при кристаллизации две двойных эвтектики $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3$ (рис. 4, а), $\gamma + VC$ (рис. 4, б) и тройную $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$. Соуществование карбидов разных форм и типов определяется составом чугуна и условиями его кристаллизации.

Состав карбидов и металлической основы переменный и зависит от химического состава сплава и скорости охлаждения при затвердевании. Карбиды $(Fe, Cr, V)_7C_3$ содержат 26,0–48,0% железа, 41,0–52,0% хрома, 9,0–22,0% ванадия, карбид ванадия ограниченно растворяет железо (до 2,0–5,0%), несколько больше – хром (8,0–16,0%).

В зависимости от состава хромованадиевых чугунов формируются 5 типов структур сплавов (структурных классов): 1 – доэвтектическая, состоящая из избыточных дендритов аустенита (или продуктов его распада) и тройной эвтектики $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$; 2 – структура, состоящая из двух эвтектик $\gamma + VC$ (сферолитная форма) и $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$; 3 – структура, состоящая из двух эвтектик $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3$ и $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$; 4 – структура, состоящая из предэвтектических карбидов VC и эвтектик $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3$ и $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$; 5 – структура, состоящая из избыточных карбидов VC (или карбидов $(Fe, Cr, V)_7C_3$) и эвтектик $\gamma + VC$, $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$. Установлено, что различные структурные типы формируются в чугунах следующих составов, %: 1 тип – 2,6 C; 14–20 Cr; 3 V и 3,2 C; 14 Cr; 3 V; 2 тип – 2,6 C; 14 Cr; 9 V; 2,6 C; 14–20 Cr; 9 V; 3 тип – 3,2 C; 20 Cr; 3 V; 4 тип – 3,2 C; 14 Cr; V 9 и 2,9 C; 17 Cr; 6 V; 5 тип – 3,2 C; 20 Cr; V 9.

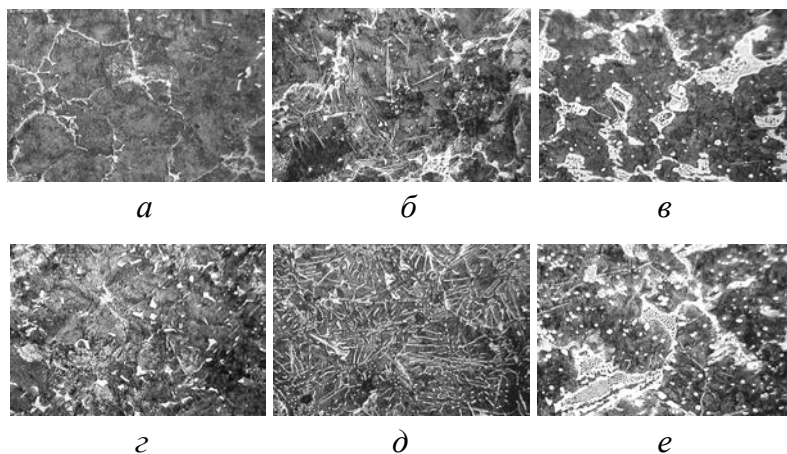


Рис. 2. Микрофотографии структур ванадиевых чугунов, x500

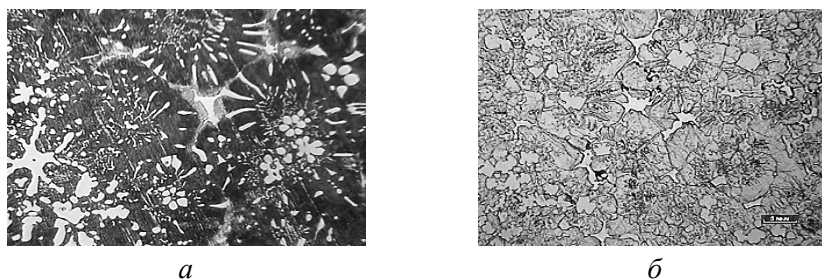
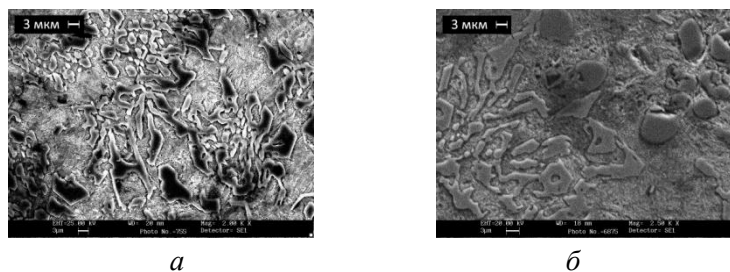


Рис. 3. Микрофотографии структур комплексно-легированных ванадиевых белых чугунов, залитых в сухую ПГФ (а) и кокиль (б), x1000

Рис. 4. Двойные эвтектики $\gamma + (\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_7\text{C}_3$ (а) и $\gamma + \text{VC}$ (б)

Легированные белые чугуны широко применяются для изготовления литых деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного и ударно-абразивного изнашивания при высоких температурах. На долговечность деталей существенно влияют процессы их взаимодействия с рабочей средой. Протекают процессы внутреннего и наружного окисления чугуна, необратимого увеличения объема отливки (роста). В результате роста может происходить коробление, растрескивание деталей. Возникающие растягивающие напряжения ускоряют процесс высокотемпературного окисления.

Длительное воздействие высоких температур и внешних нагрузок может привести к снижению

прочностных характеристик и износостойкости вследствие протекания необратимых структурных и фазовых превращений. Поэтому работающие в таких условиях отливки должны обладать комплексом свойств – высокими износо- и окалинотойкостью, ростоустойчивостью и жаропрочностью.

В работах [23, 47, 48, 65–81] были изучены структура сплавов и их поверхностных оксидных слоев, распределение элементов между структурными составляющими сплава и поверхности окисления, износостойкость, окалинотойкость и ростоустойчивость жароизносостойких чугунов, легированных комплексами Cr-Mn-Ni-Ti, Cr-Mn-Ni-Al-Ti, Cr-Mn-Ni-Nb-Ti, Cr-Mn-Ni-Al-Nb-Ti. Фазовый состав чугунов представляет собой α -фазу (феррит),

γ -фазу (аустенит), карбиды типа M_7C_3 и карбиды типа MC. После завершения кристаллизации во всех типах форм в сплавах формируется структура, состоящая из карбидов TiC или (Nb, Ti)C, избыточных дендритов, хромистокарбидной эвтектики. В структуре чугунов, легированных Nb, присутствуют вторичные карбиды типа Cr_7C_3 (рис. 5).

Выявлены различные типы оксидных слоев чугуна после испытаний на окислительную стойкость. Методом локального микрорентгеноспектрального анализа определили распределение химических элементов в различных участках поверхности и по глубине оксидного слоя чугуна. При содержании хрома в сплаве более 19% в оксидной пленке его концентрация более 30%, в результате на поверхности образуется плотная сплошная оксидная пленка, а глубина проникновения коррозии снижается. Определено отрицательное влияние марганца на окислительную стойкость. При повышении содержания Mn в сплаве от 3,5 до 5% происходит увеличение его концентрации в поверхности оксидной пленки от 20–30 до 35–45%, при этом снижается окислительная стойкость чугунов в 1,5–2,7 раз.

Установлены закономерности влияния первичной литой структуры на структуру, химический и фазовый состав, толщину оксидных слоев жаростойких КЛБЧ. Первичная литая структура чугунов сильно влияет на строение оксидных слоев. При этом обнаруживается эффект наследования от первичной литой структуры чугуна строения оксидных слоев; эффект наследования состава оксидной пленки в зависимости от распределения легирующих элементов в поверхностном слое литых чугунов; явление влияния частиц карбидов и эвтектики на рост оксидного слоя чугунов (рис. 6).

Выявлен эффект дисперсионного твердения сплавов в форме при совместном легировании ниобием и хромом жаростойких чугунов, что обеспечивает стабильность структуры чугунов в условиях эксплуатации при повышенных температурах. Структура чугунов состоит из карбидов (Nb, Ti)C, избыточных дендритов, эвтектики и вторичных карбидов типа M_7C_3 (см. рис. 5, 6).

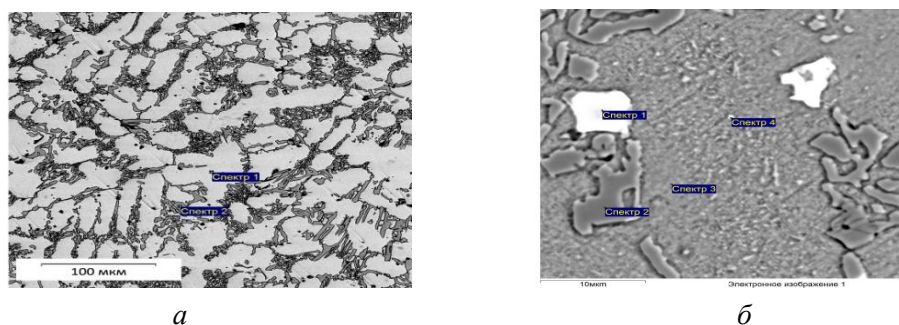


Рис. 5. Структура чугунов, легированных комплексами Cr-Mn-Ni-Ti (а) и Cr-Mn-Ni-Al-Nb-Ti (б)

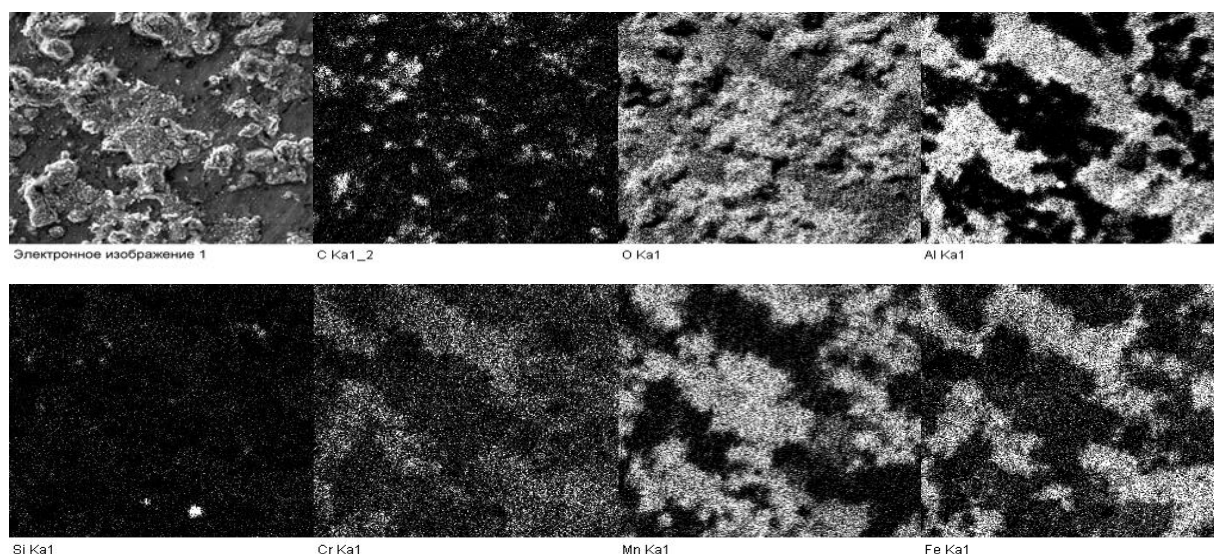


Рис. 6. Электронное изображение окисленной поверхности сплава системы Fe-C-Cr-Mn-Ni-Al-Ti и поэлементное картирование

Одновременному повышению износо- и жаростойкости алюминий и ниобий при раздельном легировании не способствуют. Поэтому легирование алюминием или ниобием определяется тем, какое специальное свойство превалирует при эксплуатации отливок из данных чугунов.

Результаты исследования совместного влияния алюминия и ниобия на структуру и свойства чугуна из нового состава показали положительное влияние этих элементов на структуру и весь комплекс свойств. Совместное легирование этими элементами способствует одновременному повышению жаростойкости и износостойкости.

Изучение структур сплавов исследованных систем показало, что достаточное легирование и изменение условий охлаждения при затвердевании обеспечивают формирование различных сочетаний двойных и тройных эвтектик с различным взаимным расположением металлической основы и упрочняющей фазы.

В результате анализа влияния химического состава и условий охлаждения на типы структур для каждой системы сплавов в исследуемых концентрационных интервалах авторами установлены закономерности строения избыточных фаз, эвтектических композиций и металлической основы, что позволило предложить классификацию по следующим признакам [10, 47, 48, 82]:

– **по типу металлической матрицы:** ферритные, перлитные, бейнитные, аустенитные, перлитно-ферритные, мартенситно-аустенитные, мартенситно-бейнитные, мартенситно-трооститные, мартенситно-ферритные, ферритно-аустенитные;

– по типу эвтектики:

- с эвтектикой ледебурит – γ + цементит (Fe_3C);
- с эвтектикой γ + карбиды типа M_7C_3 ;
- с эвтектикой γ + карбиды типа MC, например VC;

• с эвтектикой γ + M_7C_3 и MC, например $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ и VC и др.;

– по количеству эвтектик и фаз, образующих ее:

- чугуны с одной двойной эвтектикой;
- двойной и тройной эвтектиками (γ + MC и γ + MC + M_3C ; γ + MC и γ + MC + M_7C_3 , γ + M_7C_3 и γ + MC + M_7C_3);

• двумя двойными и тройной эвтектиками (γ + M_3C , γ + M_7C_3 , γ + M_7C_3 + MC) и др.;

– по морфологии эвтектики:

– эвтектика γ + VC сферолитной формы;

– эвтектики γ + $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ и γ + $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_7\text{C}_3$ + VC, имеющие в поперечном сечении имеют форму розетки, а в продольном – веера;

– ледебуритоподобная эвтектика γ + Fe_3C + VC;

– **по морфологии фаз, образующих эвтектику:**

- разветвленная (волоконная (γ + VC));
- компактная (зернистая (γ + VC));
- стержневая (γ + Cr_7C_3)

Заключение

Таким образом, анализ научно-исследовательских работ в области получения отливок из белых легированных чугунов с требуемым комплексом механических, физико-механических и специальных свойств показал, что все они, как правило, направлены на разработку технологий управления процессами формирования необходимой макро- и микроструктуры сплавов через выбор оптимального состава, подготовку расплава к заливке в формы (выплавка, рафинирование, модифицирование, температура заливки, высокотемпературная обработка расплава), скорость кристаллизации при формировании первичной литой структуры и вторичной фазовой перекристаллизации при термической обработке.

Список литературы

1. Жуков А.А., Сильман Г.И., Фрольцов М.С. Износостойкие отливки из комплексно-легированных белых чугунов. М.: Машиностроение, 1984. 104 с.
2. Бобро Ю.Г. Легированные чугуны. М.: Metallurgia. 1976. 288 с.
3. Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г. Инокулирование железоуглеродистых сплавов. М.: Metallurgia, 1993. 416 с.
4. Комплексно-легированные белые чугуны функционального назначения в литом и термообработанном состоянии / Ри Э.Х., Ри Хосен, Колокольцев В.М., Петроченко Е.В. и др. Владивосток: Дальнаука, 2006. 275 с.
5. Сильман Г.И. Термодинамика и термокинетика структурообразования в чугунах и сталях. М.: Машиностроение, 2007. 302 с.
6. Гарбер М.Е. Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация. М.: Машиностроение, 2010. 280 с.
7. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
8. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны – эволюция и перспективы // Литейное производство. 2000. № 9. С. 15–16.
9. Влияние структуры на свойства белых хромистых чугунов / Косицина И.И., Сагарадзе В.В., Макаров А.В. и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. 1996. № 4. С. 10.
10. Петроченко Е.В. Повышение эксплуатационной стойкости отливок из белых легированных чугунов за счет комплексного воздействия на их структуру: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2003. 140 с.
11. Bedolla-Jacuinde A., Aguilar S.L., and Hernandez B. Eutectic Modification in a Low-Chromium White Cast Iron by a Mixture of Titanium, Rare Earths, and Bismuth: I. Effect on Microstructure, Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 14(2), 2005, pp. 149–157.
12. Neville A., Reza F., Chiovelli S., and Revega T. Characterization and Corrosion Behavior of High-Chromium White Cast Irons, Journal Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 37F, 2006, pp. 2339–2347.
13. Karantzalis A.E., Lekatou A., Kapoglou A., Mavros H., and Dracopoulos V. Phase Transformations and Microstructural Observations During Subcritical Heat Treatments of a High-Chromium Cast Iron, Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, pp. 1030–1039.
14. Sain P.K., Sharma C.P., and Bhargava A.K. Microstructure Aspects of a Newly Developed, Low Cost, Corrosion-Resistant White Cast Iron, Journal Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 44F, 2013, pp. 1665–1671.
15. Yoganandh J., Natarjan S., and Kumares S.P. Babu. Erosive

- Wear Behavior of Nickel-Based High Alloy White Cast Iron Under Mining Conditions Using Orthogonal Array, *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 22(9), 2013, pp. 2534–2540.
16. Гольдштейн Я. Е., Гольдштейн В. А. Металлургические аспекты повышения долговечности деталей машин. Челябинск: Металл, 1995. 512 с.
17. Трухин В.В., Печень П.В., Трухина Е.Ю. Влияние термической обработки на обрабатываемость среднехромистого износостойкого чугуна // *Вестник КузГТИ*. 2001. № 5. С. 31–34.
18. Косилов А.А., Круглов А.А., Ребонен В.Н. Термическая обработка высокохромистого чугуна // *Литейное производство*. 2001. № 6. С. 13–14.
19. Филипов М.А., Лхагвадорж П., Плотников Г.Н. Структурные факторы повышения износостойкости белого хромистого чугуна // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2000. № 11. С. 10–13.
20. Емелишин А.Н. Влияние титана и бора на износостойкость чугуна, предназначенного для механической обработки неметаллических материалов инструмента из хромистых чугунов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2000. №2. С. 28–29.
21. Коррозионная стойкость и жаростойкость легированных белых чугунов / Ри Э.Х., Ри Хосен, Тейх В.А., Муромцева Е.В. // *Литейное производство*. 2000. №3. С. 13–17.
22. Колокольцев В.М. Теоретические и технологические основы разработки литейных износостойких сплавов системы железо-углерод-элемент: дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск, 1995. 427 с.
23. Петроченко Е.В. Особенности кристаллизации, формирования структуры и свойств износостойких и жаростойких чугунов в различных условиях охлаждения: дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск, 2012. 310 с.
24. Сорокин Г.М. Аспекты металловедения в проблеме долговечности машин // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1990. № 2. С. 57–60.
25. Асташкевич Б.М. Повышение надежности железнодорожных тормозных колодок // *Литейное производство*. 1995. № 6. С. 5–6.
26. Абразивная износостойкость литых металлов и сплавов / В.М. Колокольцев, Н.М. Муляк, К.Н. Вдовин. Е.В. Синицкий; под ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 228 с.
27. Колокольцев В.М., Адищев В.В., Милуков С.В. Исследование износостойкости чугунов для литых бандажей дробильно-размольного оборудования // *Антифрикционные и износостойкие чугуны: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Винница, 1992*. С. 30–31.
28. Карбидообразование в расплавах высокохромистых чугунов / О.М. Романов, Л.Я. Козлов, Л.М. Романов, Е.В. Рожкова и др. // *Литейное производство*. 1991. № 6. С. 7.
29. Раскисление и рафинирование высокохромистого чугуна / В.А. Тейх, Ри Хосен, А.Н. Литвиненко и др. // *Литейное производство*. 1984. № 8. С. 10.
30. Маркин И.С., Вунштейн Ф.З. Изготовление абразивостойких деталей из белых износостойких чугунов: Обзорная информация. М.: НИИИнформтяжмаш, 1972. 42 с.
31. Совершенствование режимов плавки высокохромистого чугуна и термообработки отливок из него / В.М. Колокольцев, В.Н. Аксенов, Н.Р. Забелин и др. // *Литейное производство*. 1994. № 3. С. 5–6.
32. Термовременная обработка жидких сплавов и стали / Б.А. Баум, Г.В. Тягунов, Е.Е. Барышев и др. // *Сталь*. 1996. № 6. С. 16–20.
33. Карпенко М.И., Марукович Е.И. Износостойкие отливки. Минск: Наука и техника, 1984. 216 с.
34. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства. М.: Металлургия, 1988. 256 с.
35. Чугун: справ. изд. / под ред. А.Д. Шермана и А.А. Жукова. М.: Металлургия, 1991. 576 с.
36. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Воронков Б.Н. Комплексно-легированные белые износостойкие чугуны. Челябинск: Печатный салон «Издательство РЕКПОЛ», 2005. 178 с.
37. Специальные чугуны. Литье, термическая обработка, механические свойства: учеб. пособие / Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Соловьев В.П., Цыбров С.В.; под ред. Колокольцева В.М. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. 187 с.
38. Колокольцев В.М., Шевченко А.В. Рафинирование и модифицирование комплексно-легированных белых чугунов // *Молодежь. Наука. Будущее*. Вып. 7: сб. науч. тр. студентов / под. ред. С.В. Пыхтуновой. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. С. 55–58.
39. Воронков Б.В., Колокольцев В.М., Шевченко А.В. Улучшение свойств жароизносостойкого чугуна рафинированием и модифицированием // *Современная металлургия начала нового тысячелетия*: сб. науч. тр. Ч. 1. Липецк: ЛГТУ, 2007. С. 118–125.
40. Колокольцев В.М., Шевченко А.В., Быков К.В. Рафинирование и модифицирование специальных чугунов // *Литейные процессы*. Вып. 7: межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. С. 98–101.
41. Колокольцев В.М., Гольцов А.С., Шевченко А.В. Повышение свойств чугунов специального назначения // *Литейное производство сегодня и завтра: труды 8-й Всерос. науч.-практ. конференции*. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. С. 159–162.
42. Повышение срока службы деталей из жароизносостойких чугунов / Колокольцев В.М., Гольцов А.С., Шевченко А.В., Молочкова О.С., Воронков Б.В. // *Литейщик России*. 2009. №6. С. 9–12.
43. Влияние микролегирования и модифицирования на свойства жароизносостойких чугунов / Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Шевченко А.В., Гольцов А.С. // *Труды 9 съезда литейщиков России*. Уфа, 2009. С. 12–15.
44. Колокольцев В.М., Шевченко А.В. Модифицирование расплава белого чугуна боридом титана // *Литейные процессы*. Вып. 9: межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. С. 208–214.
45. Повышение эксплуатационной стойкости отливок из чугуна ИЧХ28Н2 путем модифицирования его расплава комплексной лигатурой на основе титана и бора / Колокольцев В.М., Шевченко А.В., Шатохин И.М., Гольцов А.С. // *Литейщик России*. 2010. №8. С. 9–12.
46. Колокольцев В.М., Шевченко А.В. Повышение свойств отливок из чугунов специального назначения путем рафинирования и модифицирования их расплавов // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2011. №1. С. 23–29.
47. Петроченко Е.В. Взаимосвязь химического состава, структуры и свойств комплексно-легированных белых чугунов в литом состоянии // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2012. № 3. С. 51–55.
48. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V.. Structure Feature And Properties Of High-Alloy White Irons // *Vestnik Of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2013. №5 (45), 2013, pp. 5–8.
49. Петроченко Е.В. Влияние фазового состава на износостойкость отливок из белого чугуна // *Литейщик России*. 2002. № 9. С. 12–15.
50. Емелишин А.Н., Петроченко Е.В. Повышение стойкости оснастки прессформ для прессования периклазового кирпича // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2003. №3. С.56–59.
51. Емелишин А.Н., Петроченко Е.В. Повышение качества и эксплуатационной стойкости деталей и инструмента, работающего в условиях абразивного изнашивания // *Шлифабразив 2003: сб. статей Междунар. науч.-техн. конф. Волжский, 2003*. С. 190–192.
52. Влияние химического состава на структуру и свойства белых ванадиевых чугунов / Петроченко Е.В., Петроченко О.С., Шекунов Е.В., Петроченко Т.С. // *Материаловедение и термическая обработка металлов: междунар. сб. науч. трудов*. Магнитогорск, 2004. С. 101–103.
53. Петроченко Е.В. Структура и износостойкость ванадиевых чугунов // *Литейное производство сегодня и завтра: тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 2004*. С. 61–65.
54. Формирование структуры и свойств ванадиевых чугунов при их затвердевании / Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Еме-

- люшин А.Н., Потапов М.Г. // Изв. вузов. Черная металлургия. 2005. № 4. С. 41–43.
55. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В. Износостойкие железоуглерод-ванадиевые сплавы // Труды VII съезда литейщиков. Новосибирск, 2005. С. 105–106.
56. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В. Особенности формирования карбидной фазы белых чугунов в различных условиях охлаждения // Материалы 3-й междунар. практ. конф. «Прогрессивные литейные технологии». М., 2005. С. 76–81.
57. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Молочков П.А. Комплексное воздействие на структуру белых износостойких чугунов с целью повышения эксплуатационной стойкости отливок // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2004. № 4. С. 23–29.
58. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Молочков П.А. Структура и износостойкость хромованадиевых чугунов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2004. № 7. С. 25–28.
59. Петроченко Е.В. Взаимосвязь химического состава, структуры и свойств комплексно-легированных белых чугунов в литом состоянии // Изв. вузов. Черная металлургия. 2012. № 3. С. 51–55.
60. Петроченко Е.В., Валишина Т.С. Влияние химического состава, условий кристаллизации и режимов термической обработки на особенности микроструктуры, механические и специальные свойства белых хромованадиевых чугунов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2009. № 2.
61. Петроченко Е.В. Комплексное влияние легирующих элементов и условий затвердевания на процессы структурообразования и свойства литых композиционных железоуглеродистых сплавов // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: тез. докл. 13-го Междунар. симпозиума. М.: Изд-во МАИ, 2007. С. 212–213.
62. Колокольцев В.В., Петроченко Е.В. Особенности формирования карбидной фазы белых чугунов в различных условиях охлаждения // Прогрессивные литейные технологии: материалы междунар. практ. конф. М., 2006. С. 76–81.
63. Петроченко Е.В. Структура литых композиционно упрочненных железоуглеродистых сплавов // II Международная школа «Физическое материаловедение». Актуальные проблемы физического материаловедения сталей и сплавов: XVIII Уральская школа металлургов-термистов. Тольятти, 2006. С. 149.
64. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В. Закономерности формирования эвтектик в комплексно-легированных белых чугунах в различных условиях охлаждения при литье и термической обработке // Актуальные проблемы физического материаловедения сталей и сплавов: материалы XXI Уральской школы металлургов-термистов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. С. 89.
65. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Миронов О.А. Влияние химического состава на формирование структуры и свойств жароизносостойких чугунов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2007. № 3. С. 44–47.
66. Исследование структуры и свойств жароизносостойких чугунов / Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Миронов О.А., Воронков Б.В. // Труды VII съезда литейщиков. Т.1. Новосибирск, 2005. С. 105–106.
67. Структура и свойства жароизносостойкого белого чугуна / Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Миронов О.А., Воронков Б.В., Полетаев В.В., Сулейманов В.М. // Литейщик России. 2005. № 7. С. 7–10.
68. Жароизносостойкий чугун / Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Воронков Б.В., Миронов О.А., Сибгатуллин С.К. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2005. № 3 (11). С. 35–37.
69. Петроченко Е.В. Исследование окалиностойкости комплексно-легированных белых чугунов // Материалы всерос. науч. конф.: в 7 ч. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. Ч. 2. С. 211–212.
70. Петроченко Е.В., Петроченко О.С. Исследование структуры и свойств комплексно-легированных чугунов // V1 Уральская школа-семинар металлургов-молодых ученых: сб. науч. тр. Екатеринбург, 2004. С. 38.
71. Петроченко Е.В., Молочкова О.С. Исследование структуры и свойств жароизносостойких чугунов // Материалы 65-й науч.-техн. конф.: сб. докл. Магнитогорск, 2007. Т. 1. С. 37–39.
72. Петроченко Е.В., Молочкова О.С. Анализ оксидных слоев жароизносостойких чугунов // VII Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов-молодых ученых: сб. науч. тр. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. С. 235–237.
73. Петроченко Е.В., Молочкова О.С. Изыскание составов жароизносостойких комплексно-легированных белых чугунов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2009. № 8. С. 31–34.
74. Повышение срока службы деталей из жароизносостойких чугунов / Колокольцев В.М., Воронков Б.В., Гольцов А.С., Молочкова О.С. и др. // Литейщик России. 2009. № 6. С. 9–12.
75. Петроченко Е.В., Молочкова О.С. Разработка перспективных материалов для изготовления жароизносостойких литых изделий // Материалы XVII международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. Г.А. Горшкова. Ярополец, 2011. С. 147–149.
76. Колокольцев В.М., Гольцов А.С. Синтез и внедрение новых жароизносостойких чугунов для изготовления отливок деталей специального назначения // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. докл. IV междунар. науч.-техн. конф. Ч.1. Липецк: ЛГТУ, 2007. С. 85–89.
77. Колокольцев В.М., Гольцов А.С., Брялин М.Ф. Повышение эксплуатационных свойств отливок из жароизносостойких хромомарганцевых чугунов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 4 (20). С. 22–25.
78. Петроченко Е.В., Миронов О.А., Молочкова О.С. Исследование влияния параметров карбидной фазы на механические и специальные свойства комплексно-легированных белых чугунов // Материаловедение и термическая обработка металлов: междунар. сб. науч. тр. / под ред. А.Н. Емелишина и Е.В. Петроченко. Магнитогорск ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. С. 238–242.
79. Петроченко Е.В., Молочкова О.С. Повышение свойств жароизносостойких чугунов дополнительным легированием ниобием // XXI Уральская школа металлургов-термистов «Актуальные проблемы физического материаловедения сталей и сплавов»: сб. науч. тр. Магнитогорск ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2012. С. 261–262.
80. Петроченко Е.В., Молочкова О.С. Анализ взаимосвязи химического состава, условий охлаждения при затвердевании с особенностями строения сплавов, окисленной поверхности и свойствами комплексно-легированных белых чугунов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. № 4 (36). С. 50–53.
81. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Молочкова О.С. Влияние химического состава, условий охлаждения при затвердевании на структуру и свойства жароизносостойких комплексно-легированных железоуглеродистых сплавов // Технология металлов. 2013. № 1. С. 10–14.
82. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В. Классификация белых комплексно-легированных чугунов с учетом особенностей их структуры // Литейное производство сегодня и завтра: тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2006. С. 75–79.
83. 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.

METALLURGICAL AND PHYSICOMETALLURGICAL ASPECTS RELATED TO IMPROVEMENT OF FUNCTIONAL PROPERTIES OF WHITE IRON CASTINGS

Kolokoltsev Valery Mikhailovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Rector of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 (3519) 29 84 02. E-mail: kwm@magtu.ru.

Petrochenko Elena Vasilyevna – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: evp3738@mail.ru.

Abstract. This article analyzes research on alloy white iron castings produced with a required set of mechanical, physical and mechanical and special properties. It is demonstrated that research focuses, as a rule, on development of techniques for controlling formation of a required macro- and microstructure of alloys by choosing an optimal composition, preparing melts for casting into molds (melting, refining, modification, casting temperature, high-temperature treatment of melts), and crystallization speed when forming a primary cast structure and secondary phase recrystallization during heat treatment.

Keywords: white cast irons, alloying complex, cooling rate, modification, refining, temperature time treatment of melts, heat treatment, structure, mechanical properties, wearability, heat resistance.

References

1. Zhukov A.A., Silman G.I., Froltsov M.S. *Iznosostoykie otlivki iz kompleksno-legirovannykh belykh chugunov* [Wear-resistant castings from complex alloyed white cast irons]. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 104 p.
2. Bobro Yu.G. *Legirovannye chuguny* [Alloyed irons]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 288 p.
3. Goldstein Ya.E., Mizin V.G. *Inokulirovanie zhelezouglerodistykh splavov* [Inoculation of iron-carbon alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1993, 416 p.
4. Ri E.Kh., Ri Khosen, Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. et al. *Kompleksno-legirovannye belye chuguny funktsionalnogo naznacheniya v litom i termoobrabotannom sostoyaniyakh* [As-cast and heat treated complex alloyed white cast irons of a functional application]. Vladivostok: Dalnauka, 2006, 275 p.
5. Silman G.I. *Termodinamika i termokinetika strukturoobrazovaniya v chugunakh i stalyakh* [Thermodynamics and thermokinetics of structure formation in irons and steels]. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 302 p.
6. Garber M.E. *Iznosostoykie belye chuguny: svoystva, struktura, tekhnologiya, ekspluatatsiya* [Wear-resistant white irons: properties, structure, technology, operation]. Moscow: Mashinostroenie, 2010, 280 p.
7. Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokolnikov M.G. *Abrazivnoe iznashivanie* [Abrasive wear]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 224 p.
8. Tsylin I.I. *Wear-resistant white irons – evolution and prospects*. *Foundry*, 2000, no. 9, pp. 15–16.
9. Kositsina I.I., Sagaradze V.V., Makarov A.V. et al. Effect of the structure on properties of chromium white cast irons. *Physical metallurgy and metal heat treatment*, 1996, no. 4, pp. 7–10.
10. Petrochenko E.V. *An increase in service durability of alloyed white iron castings due to an integrated effect on their structure*. *Ph.D. dissertation*. Magnitogorsk, 2003, 140 p.
11. Bedolla-Jacuinde A., Aguilar S.L., and Hernandez B. Eutectic Modification in a Low-Chromium White Cast Iron by a Mixture of Titanium, Rare Earths, and Bismuth: I. Effect on Microstructure, *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 14(2), 2005, pp. 149–157.
12. Neville A., Reza F., Chiovelli S., and Revega T. Characterization and Corrosion Behavior of High-Chromium White Cast Irons, *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 37F, 2006, pp. 2339–2347.
13. Karantzalis A.E., Lekatou A., Kapoglou A., Mavros H., and Dracopoulos V. Phase Transformations and Microstructural Observations During Subcritical Heat Treatments of a High-Chromium Cast Iron, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2012, pp. 1030–1039.
14. Sain P.K., Sharma C.P., and Bhargava A.K. Microstructure Aspects of a Newly Developed, Low Cost, Corrosion-Resistant White Cast Iron, *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 44F, 2013, pp. 1665–1671.
15. Yoganandh J., Natarajan S., and Kumares S.P. Babu. Erosive Wear Behavior of Nickel-Based High Alloy White Cast Iron Under Mining Conditions Using Orthogonal Array, *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 22(9), 2013, pp. 2534–2540.
16. Goldstein Ya.E., Goldstein V.A. *Metallurgical aspects of durability improvement of machine parts* [Metallurgicheskie aspekty povysheniya dolgovechnosti detaley mashin]. Chelyabinsk: Metall, 1995, 512 p.
17. Trukhin V.V., Pechen P.V., Trukhina E.Yu. Effect of heat treatment on working properties of medium-chromium wear-resistant cast irons. *Vestnik of KuzSTI*, 2001, no. 5, pp. 31–34.
18. Kosilov A.A., Kruglov A.A., Rebonen V.N. Heat treatment of high-chromium cast irons. *Foundry*, 2001, no. 6, pp. 13–14.
19. Filipov M.A., Lkhagvadorzh P., Plotnikov G.N. Structural factors of wearability improvement of chromium white cast iron. *Physical metallurgy and metal heat treatment*, 2000, no. 11, pp. 10–13.
20. Emelyushin A.N. Effect of titanium and boron on wearability of cast iron used for mechanical treatment of non-metallic materials of chromium cast iron tools. *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2000, no. 2, pp. 28–29.
21. Ri E.Kh., Ri Khosen, Teikh V.A., Muromtseva E.V. Corrosion resistance and heat resistance of alloyed white cast irons. *Foundry*, 2000, no. 3, pp. 13–17.
22. Kolokoltsev V.M. *Theoretical and technological fundamentals of development of casting wear-resistant Fe-C-element system alloys*. D.Sc. dissertation. Magnitogorsk, 1995, 427 p.
23. Petrochenko E.V. *Crystallization, formation of the structure and properties of wear-resistant and heat-resistant cast irons in different cooling conditions*. D.Sc. dissertation. Magnitogorsk, 2012, 310 p.
24. Sorokin G.M. Physicometallurgical aspects in an issue on lifetime of machines. *Physical metallurgy and metal heat treatment*, 1990, no. 2, pp. 57–60.
25. Astashkevich B.M. An increase in reliability of railway brake shoes. *Foundry*, 1995, no. 6, pp. 5–6.
26. Kolokoltsev V.M., Mulyavko N.M., Vdovin K.N., Sinitsky E.V. *Abrazivnaya iznosostoykost litykh metallov i splavov* [Abrasive wear resistance of cast metals and alloys]. Ed. by Kolokoltsev V.M. Magnitogorsk: MSTU, 2004, 228 p.
27. Kolokoltsev V.M., Adishchev V.V., Milyukov S.V. Research on wear resistance of cast irons for cast bands of crushing and grinding equipment. *Antifriktsionnye i iznosostoykie chuguny* [Anti-friction and wear-resistant cast irons: papers of the International

- Scientific and Technical Conference]. Vinnitsa, 1992, pp. 30–31.
28. Romanov O.M., Kozlov L.Ya., Romanov L.M., Rozhkova E.V. et al. Carbide forming in molten high-chromium irons. *Foundry*, 1991, no. 6, p. 7.
 29. Teykh V.A., Ri Khosen, Litvinenko A.N. et al. High-chromium cast iron deoxidation and refining. *Foundry*, 1984, no. 8, p. 10.
 30. Markin I.S., Vunstein F.Z. *Izgotovlenie abrazivostoykikh detalей iz belykh iznosostoykikh chugunov: Obzornaya informatsiya* [Manufacturing of abrasion-resistant parts from wear-resistant white cast irons: Survey information]. Moscow: NIInformtyazhmash, 1972, 42 p.
 31. Kolokoltsev V.M., Aksenov V.N., Zabelin N.R. et al. Improvement of modes of high-chromium iron melting and heat treatment of such castings. *Foundry*, 1994, no. 3, pp. 5–6.
 32. Baum B.A., Tyagunov G.V., Baryshev E.E. et al. Temperature time treatment of liquid alloys and steel. *Steel*, 1996, no. 6, pp. 16–20.
 33. Karpenko M.I., Marukovich E.I. *Iznosostoykie otlivki* [Wear-resistant castings]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1984, 216 p.
 34. Tsypin I.I. *Belye iznosostoykie chuguny. Struktura i svoystva* [Wear-resistant white cast irons. Structure and properties]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 256 p.
 35. *Chugun* [Cast iron: book of reference]. Ed. by Sherman A.D. and Zhukov A.A. Moscow: Metallurgiya, 1991, 576 p.
 36. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Voronkov B.N. *Kompleksno-legirovannye belye iznosostoykie chuguny* [Wear-resistant complex alloyed white cast irons]. Chelyabinsk: REKPOL, 2005, 178 p.
 37. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Soloviev V.P., Tsybrov S.V. *Spetsialnye chuguny. Litie, termicheskaya obrabotka, mekhanicheskie svoystva* [Special cast irons. Casting, heat treatment, mechanical properties: a textbook]. Ed. by Kolokoltsev V.M. Magnitogorsk: MSTU, 2009, 187 p.
 38. Kolokoltsev V.M., Shevchenko A.V. Complex alloyed white cast iron refining and modification. *Molodezh. Nauka. Budushchee* [Youth. Science. Future]. Issue no. 7: collection of student research papers. Ed. by Pykhtunova S.V. Magnitogorsk: MSTU, 2007, pp. 55–58.
 39. Voronkov B.V., Kolokoltsev V.M., Shevchenko A.V. Improvement of heat- and wear-resistant cast iron properties by refining and modification. *Sovremennaya metallurgiya nachala novogo tysyacheletiya* [Modern metallurgy in the beginning of a new millennium: collection of research papers]. Part 1. Lipetsk: LSTU, 2007, pp. 118–125.
 40. Kolokoltsev V.M., Shevchenko A.V., Bykov K.V. Special cast iron refining and modification. *Liteynye protsessy* [Casting processes]. Issue no. 7: interregional collection of research papers. Magnitogorsk: MSTU, 2008, pp. 98–101.
 41. Kolokoltsev V.M., Goltsov A.S., Shevchenko A.V. Improvement of special cast iron properties. *Liteynoe proizvodstvo segodnya i zavtra* [The foundry of today and tomorrow: proceedings of the 8th All-Russian Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg: the Polytechnic University, 2010, pp. 159–162.
 42. Kolokoltsev V.M., Goltsov A.S., Shevchenko A.V., Molochkova O.S., Voronkov B.V. Increasing a life time of heat- and wear-resistant cast iron parts. *A caster of Russia*, 2009, no. 6, pp. 9–12.
 43. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Shevchenko A.V., Goltsov A.S. Effect of microalloying and modification on heat- and wear-resistant cast iron properties. *Trudy 9-go sezda liteyshchikov Rossii* [Proceedings of the 9th convention of Russian casters]. Ufa, 2009, pp. 12–15.
 44. Kolokoltsev V.M., Shevchenko A.V. Modification of molten white cast iron by titanium boride. *Liteynye protsessy* [Casting processes]. Issue no. 9: interregional collection of research papers. Magnitogorsk: MSTU, 2010, pp. 208–214.
 45. Kolokoltsev V.M., Shevchenko A.V., Shatokhin I.M., Goltsov A.S. An increase in service durability of IChKh28N2 iron castings by modification of molten iron with a complex alloy containing titanium and boron. *A caster of Russia*, 2010, no. 8, pp. 9–12.
 46. Kolokoltsev V.M., Shevchenko A.V. An increase in properties of special iron castings by refining and modification of molten iron. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 1, pp. 23–29.
 47. Petrochenko E.V. A relation between a chemical composition, structure and properties of complex alloyed white cast irons in an as-cast state. *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2012, no. 3, pp. 51–55.
 48. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. Structure Feature and Properties of High-Alloy White Irons. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 5 (45), 2013, pp. 5–8.
 49. Petrochenko E.V. Effect of a phase composition on wearability of white iron castings. *A caster of Russia*, 2002, no. 9, pp. 12–15.
 50. Emelyushin A.N., Petrochenko E.V. An increase in durability of die attachments for molding periclase bricks. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2003, no. 3, pp. 56–59.
 51. Emelyushin A.N., Petrochenko E.V. An increase in the quality and service durability of parts and tools operating in abrasive wear conditions. *Shlifabraziv 2003* [Grinding and abrasion: collection of papers of the international scientific and technical conference]. Volzhsky, 2003, pp. 190–192.
 52. Petrochenko E.V., Petrochenko O.S., Shekunov E.V., Petrochenko T.S. Effect of a chemical composition on the structure and properties of vanadium white cast irons. *Materialovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Materials science and metal heat treatment: international collection of research papers]. Magnitogorsk, 2004, pp. 101–103.
 53. Petrochenko E.V. Structure and wearability of vanadium irons. *Liteynoe proizvodstvo segodnya i zavtra* [The foundry of today and tomorrow: abstracts of the international scientific and practical conference]. Saint Petersburg, 2004, pp. 61–65.
 54. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Emelyushin A.N., Potapov M.G. Formation of the structure and properties of vanadium cast irons during their crystallization. *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2005, no. 4, pp. 41–43.
 55. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. Wear-resistant Fe-C-V alloys. *Trudy 7-ogo sezda liteyshchikov* [Papers of the 7th convention of casters]. Novosibirsk, 2005, pp. 105–106.
 56. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. Formation of a carbide phase of white cast irons in different cooling conditions. *Materialy III mezhdunarodnoy prakticheskoy konferentsii "Progressivnye liteynye tekhnologii"* [Papers of the 3rd International Practical Conference "Advanced casting technologies"]. Moscow, 2005, pp. 76–81.
 57. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Molochkov P.A. An integrated effect on the structure of wear-resistant white cast irons to increase service durability of castings. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2004, no. 4, pp. 23–29.
 58. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Molochkov P.A. Structure and wear resistance of chromium-vanadium cast irons. *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2004, no. 7, pp. 25–28.
 59. Petrochenko E.V. A relation between a chemical composition, structure and properties of complex alloyed white cast irons in an as-cast state. *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2012, no. 3, pp. 51–55.
 60. Petrochenko E.V., Valishina T.S. Effect of a chemical composition, crystallization conditions and heat treatment modes on features of a microstructure, mechanical and special properties of

- chromium-vanadium cast irons. *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2009, no. 2.
61. Petrochenko E.V. An integrated effect of alloying elements and crystallization conditions on the formation of a structure and properties of cast composite iron-carbon alloys. *Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruktssii i sploshnykh sred* [Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continua: abstracts of the 13th International Symposium]. Moscow: MAI, 2007, pp. 212–213.
62. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. Formation of a carbide phase of white cast irons in different cooling conditions. *Materialy mezhdunarodnoy prakticheskoy konferentsii "Progressivnye litейnye tekhnologii"* [Papers of the International Practical Conference "Advanced casting technologies"]. Moscow, 2006, pp. 76–81.
63. Petrochenko E.V. The structure of cast iron-carbon alloys hardened on a compositional level. The 2nd school "Material physics". *Aktualnye problemy fizicheskogo metallovedeniya staley i splavov: XVIII Uralskaya shkola metallovedov-termistov* [Current problems of material physics of steels and alloys: the 18th Ural school of metallographers and heat treaters]. Tolyatti, 2006, 149 p.
64. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. Regularities of the formation of eutectics in complex alloyed white cast irons in different cooling conditions during casting and heat treatment. *Aktualnye problemy fizicheskogo metallovedeniya staley i splavov: XXI Uralskaya shkola metallovedov-termistov* [Current problems of material physics of steels and alloys: the 21st Ural school of metallographers and heat treaters]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, 89 p.
65. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Mironov O.A. Effect of a chemical composition on formation of the structure and properties of heat- and wear-resistant cast irons. *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2007, no. 3, pp. 44–47.
66. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Mironov O.A., Voronkov B.V. Study of the structure and properties of heat- and wear-resistant cast irons. *Trudy VII sezda liteishchikov* [Proceedings of the 7th convention of casters]. Vol.1. Novosibirsk, 2005, pp. 105–106.
67. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Mironov O.A., Voronkov B.V., Poletaev V.V., Suleimanov V.M. The structure and properties of heat- and wear-resistant white cast iron. *A caster of Russia*, 2005, no. 7, pp. 7–10.
68. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Voronkov B.V., Mironov O.A., Sibagatullin S.K. Heat- and wear-resistant cast iron. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2005, no. 3 (11), pp. 35–37.
69. Petrochenko E.V. Study of scale resistance of complex alloyed white cast irons. *Materialy vserossiyskoy nauchnoy konferentsii: v 7 chastyakh* [Papers of the all-Russian scientific conference: in 7 parts]. Part 2. Novosibirsk: NSTU, 2006, pp. 211–212.
70. Petrochenko E.V., Petrochenko O.S. Study of the structure and properties of complex alloyed cast irons. *V1 Uralskaya shkola-seminar metallovedov-molodykh uchenykh* [The 6th Ural school-workshop of metallographers and young scientists: collection of research papers]. Ekaterinburg, 2004, 38 p.
71. Petrochenko E.V., Molochkova O.S. Study of the structure and properties of heat- and wear-resistant cast irons. *Materialy 65-oy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Papers of the 65th scientific and technical conference: collection of reports]. Magnitogorsk, 2007, vol. 1, pp. 37–39.
72. Petrochenko E.V., Molochkova O.S. Analysis of oxide layers of heat- and wear-resistant cast irons. *V1I Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya Uralskaya shkola-seminar metallovedov-molodykh uchenykh* [The 7th international science and technical Ural school-workshop of metallographers and young scientists: collection of research papers]. Ekaterinburg: USTU-UIP, 2007, pp. 235–237.
73. Petrochenko E.V., Molochkova O.S. Survey on compositions of heat- and wear-resistant complex alloyed white cast irons. *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2009, no. 8, pp. 31–34.
74. Kolokoltsev V.M., Voronkov B.V., Goltsov A.S., Molochkova O.S. et al. Increasing a life time of heat- and wear-resistant cast iron parts. *A caster of Russia*, 2009, no. 6, pp. 9–12.
75. Petrochenko E.V., Molochkova O.S. Development of advanced materials for manufacturing of heat- and wear-resistant cast parts. *Materialy XVII mezhdunarodnogo simpoziuma "Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruktssii i sploshnykh sred" im. G.A. Gorshkova* [Papers of the 17th Gorshkov international symposium "Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continua"]. Yaropolets, 2011, pp. 147–149.
76. Kolokoltsev V.M., Goltsov A.S. Synthesis and introduction of new heat- and wear-resistant cast irons to cast parts of a special application. *Sovremennaya metallurgiya nachala novogo tysyacheletiya* [Modern metallurgy in the beginning of a new millennium: collection of reports of the 4th international scientific and technical conference]. Part 1. Lipetsk: LSTU, 2007, pp. 85–89.
77. Kolokoltsev V.M., Goltsov A.S., Bryalin M.F. An increase in service properties of castings from heat- and wear-resistant chromium-manganese cast irons. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2007, no. 4 (20), pp. 22–25.
78. Petrochenko E.V., Mironov O.A., Molochkova O.S. Study of the effect of carbide phase parameters on mechanical and special properties of complex alloyed white cast irons. *Materialovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Materials science and metal heat treatment: international collection of research papers]. Ed. by Emelyushin A.N. and Petrochenko E.V. Magnitogorsk: MSTU, 2009, pp. 238–242.
79. Petrochenko E.V., Molochkova O.S. Increasing properties of heat- and wear-resistant cast irons by additional alloying with niobium. *XXI Uralskaya shkola metallovedov-termistov "Aktualnye problemy fizicheskogo metallovedeniya staley i splavov"* [The 21st Ural school of metallographers and heat treaters "Current problems of material physics of steels and alloys": collection of research papers]. Magnitogorsk: MSTU, 2012, pp. 261–262.
80. Petrochenko E.V., Molochkova O.S. Analysis of a relation between a chemical composition, cooling conditions during crystallization and structural features of alloys, an oxidized surface and properties of complex alloyed white cast irons. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 4 (36), pp. 50–53.
81. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Molochkova O.S. Effect of a chemical composition, cooling conditions during crystallization on a structure and properties of heat- and wear-resistant complex alloyed iron-carbon alloys. *Technology of metals*, 2013, no. 1, pp. 10–14.
82. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. Classification of complex alloyed white cast irons by their structural features. *Liteynoe proizvodstvo segodnya i zavtra* [The foundry of today and tomorrow: abstracts of the international scientific and practical conference]. Saint Petersburg, 2006, pp. 75–79.
83. 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.

УДК 621.771

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ И РЕШЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Гун Г.С.

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

Аннотация. В статье приведен обзор основных научных направлений и результатов теоретических исследований одной из ведущих в России кафедры – машиностроительных и металлургических технологий Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.

Ключевые слова: обработка материалов давлением, качество, метизное производство, системный подход, инновационные методы.

В юбилейный год создания Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова (МГТУ) предлагаю обзор результатов теоретических достижений одной из ведущих профильных кафедр магнитогорского вуза и России – кафедры машиностроительных и металлургических технологий (ММТ). Кафедра ММТ образована в 1969 г. разделением с кафедрой обработки металлов давлением, имеет богатую, насыщенную инновациями и достижениями историю. Приведу только некоторые наиболее яркие свершения ее коллектива. За 45 лет на кафедре открыты 5 специальностей: в 1969 г. – «Обработка металлов давлением» (первая и единственная в стране на протяжении многих лет специализация – «Метизное производство»); в 1987 г. – «Порошковая металлургия, композиционные материалы, покрытия»; в 1995 г. – «Стандартизация и сертификация (в металлургии)»; в 1998 г. – «Сервис и техническая эксплуатация транспортных и технологических машин», «Материаловедение в машиностроении»; в 2010 г. – «Наноматериалы». В 1971 г. открыт НИИ биметалл, в 2008 г. – НИИ наносталей. В 1996 г. был создан на базе МГМИ и Магнитогорского металлургического комбината «Уральский региональный центр Академии проблем качества РФ», при МГМИ – «Ассоциация стандартизации, сертификации, контроля качества продукции и услуг», а также лицензированные – Орган сертификации и Международный технический комитет по стандартизации продукции. Создан сначала кандидатский, затем докторский диссертационный совет по специальности «Стандартизация и управление качеством продукции» (металлургия) – уникальный и единственный в стране по подготовке кадров такой квалификации для металлургии. На Магнитогорском металлургическом комбинате (ММК) свыше 100 человек защитили докторские и кандидатские диссертации в диссертационных советах нашего вуза, а всего только в совете по

качеству выпущено свыше 30 докторов и кандидатов наук.

В 1999 г. впервые в вузе Государственной премией в области науки и техники удостоен коллектив учёных кафедры во главе с профессором Стеблянко В.Л. за создание непрерывной промышленной линии по производству биметаллической проволоки на Магнитогорском метизно-металлургическом заводе [1, 2].

Во главе с доцентом В.Д. Голевым молодые учёные М.В. Чукин, И.Ю. Мезин, М.Я. Митлин спроектировали цех порошковой металлургии на Белебеевском заводе «Белсельмаш». Идеи молодых учёных И.Ю. Мезина, И.Г. Гуна, М.В. Чукина по переработке чугуновой обрезки изложниц в порошок послужили толчком к созданию мини-завода порошковой металлургии «Феррум» на базе ОАО «ММК». Впервые в регионе мы стали производить порошковые изделия для ВАЗа, затем во главе с профессором И.Г. Гуном создано предприятие по выпуску автокомпонентов – ЗАО «Бел-Маг», которое в настоящее время является лидером по производству автокомпонентов в России и фактически служит базовой кафедрой университета на производстве [3–5].

Нельзя не отметить издательскую деятельность кафедры ММТ, выпустившей за эти годы сотни книг, монографий, пособий, сборников; занимающей лидирующие позиции в выпуске ваковского журнала «Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова», журналов «Обработка сплошных и слоистых материалов», «Качество в обработке материалов».

Кафедра всегда отличалась самобытностью и новаторством в теоретических разработках. Так, первый заведующий кафедрой, профессор Аркулис Г.Э. разработал уникальную теорию совместной пластической деформации разнородных металлов, послужившую базой для решения задач конструирования и обработки слоистых ма-

териалов различных композиций и назначения. Эта теория в то время явилась прорывом в теории совместной деформации материалов с различными характеристиками, получила мировое признание и распространение [6, 7].

Тесное сотрудничество кафедры с метизными заводами страны и с единственным в то время исследовательским метизным центром СССР – ВНИИметизом позволило занять лидирующие позиции в теории метизного производства. Мощная группа метизников: Белалов Х.Н., Коквиных Ю.И., Кулеша В.А., Клековкина Н.А., Дорогобид В.Г., Щеголев Г.А., Харитонов В.А., Манин В.П., Чукин М.В., Корчунов А.Г. и др. фактически обеспечила теоретическую платформу метизной подотрасли СССР, а затем и России [8–12].

Международное признание получила и научная школа «порошководов»: В.Д. Голев, И.Ю. Мезин, М.В. Чукин, М.Я. Митлин, Э.М. Голубчик, М.А. Полякова и др. На рубеже 80–90-х годов прошлого столетия в университете при кафедре ММТ открыта специальность «Порошковые и композиционные материалы, покрытия» и начата подготовка высококвалифицированных инженерных кадров в области порошковых технологий и нанесения покрытий. В 1988 г. по заданию Государственного комитета по образованию СССР научно-педагогический коллектив кафедры назначен разработчиком учебного плана по специальности «Порошковые и композиционные материалы, покрытия» для всех вузов СССР.

Представители научного коллектива, вовлеченные в научные исследования по проблемам порошковой металлургии и нанесения покрытий (научные руководители – Мезин И.Ю., Чукин М.В.), приняли участие в 17 научно-исследовательских работах, в числе которых 3 федеральные научно-технические программы по исследованиям в области порошковой технологии, Международный проект с техническим университетом г. Хемниц (ФРГ), 6 грантов по фундаментальным проблемам в области металлургии и в области машиностроения. Под руководством И.Ю. Мезина разработаны теоретические принципы построения технологических процессов производства пористых металлоизделий для различных отраслей промышленности, заключающиеся в использовании холодной пластической деформации в качестве операции, обеспечивающей не только форму и размеры, но и одновременное формирование материала готового изделия, получены новые научные знания о консолидации отдельных элементов пористой металлической среды при холодном прессовании [13–18].

С кафедры ММТ вышла группа ученых, создавших кафедру технологий, сертификации и сервиса автомобилей и новое научное направление – Теория и практика производства метизов

для автопрома: И.Г. Гун, И.Ю. Мезин, И.А. Михайловский, В.И. Куцендик, В.В. Сальников, Д.С. Осипов и др. Научным коллективом под руководством д.т.н. Гуна И.Г. разработаны новые и усовершенствованы существующие процессы обработки давлением, такие как планетарная обкатка, запрессовка, высадка, штамповка, планетарно-поворотная обкатка, закатка и др.; разработана концепция производства метизов для автопрома; пакеты методик расчета и испытательные стенды для автомобильных метизов. ЗАО «БелМаг», во многом благодаря своим теоретическим разработкам, стал лидером в России по производству автокомпонентов [19–40].

Новая концепция конструирования и формирования покрытий в процессах ОМД на основе принципа обеспечения динамической устойчивости технологического и эксплуатационного деформирования при стохастичности параметров управления и состояния разработана Чукиным М.В. Им предложен метод сравнения двух специальных нечетких множеств задач технологического и эксплуатационного деформирования изделий с покрытиями, учитывающий этапность и значимость целей соответствующих показателей для комплексного критерия оптимизации; создана реологическая модель упругопластической пористой слоистой среды с межслойными границами произвольной формы и пространственной ориентации; получены условия совместной пластической деформации некомпактных элементов многослойного материала для случаев отсутствия и наличия деформационного упрочнения твердой фазы элементов композита. Под руководством М.В. Чукина проведен комплекс теоретических изысканий, в результате получены новые научные знания о процессе волочения проволоки с полимерными покрытиями при детерминированных значениях микрогеометрии межслойной границы и случайно-вероятностном характере распределения показателей микрогеометрии межслойной границы; определены границы устойчивости процесса электроконтактного напекания двухслойных покрытий при детерминированных значениях пористости и случайно-вероятностном характере распределения пористости по объему элементов композиции; выведены зависимости влияния параметров состояния пористых покрытий из самофлюсующихся порошковых сплавов на эксплуатационные показатели изделий с покрытиями при механическом воздействии абразивной среды. В результате исследований предложены теоретические принципы разработки оптимальных процессов технологического деформирования изделий с покрытиями и оптимальных конструкций покрытий в процессах эксплуатационного деформирования [41–48].

В конце прошлого столетия под руководством автора в МГТУ предложено новое научное направление – квалиметрия промышленной продукции и производственных процессов в металлургии, разработаны методология и методы комплексной количественной оценки материальных объектов, являющихся продуктом труда, технологических процессов, процессов организации работы предприятий и учреждений. Направление включает в себя разработку методов структурирования интегрального качества объекта, функционально-целевой анализ качества, исследование качества с использованием метода QFD, исследование взаимодействий отдельных свойств, разработку методов оценки отдельных и комплексных свойств, разработку методов свёртки единичных и комплексных оценок в интегральную. Предложенное нами направление основывается на холистическом подходе и теоретических положениях теории систем и системного анализа, исследовании синергетических эффектов, математическом аппарате классической и нечёткой логики [49–56].

В 21-м веке кафедра ММТ (зав. кафедрой Чукин М.В.) получила новое мощное «дыхание». Создана современная, мирового уровня лабораторно-исследовательская база, выиграны «немыслимые» конкурсные программы и гранты, только за последние 5 лет с суммой более 300 млн руб., где особенно значимы проекты по созданию нового высокотехнологичного производства [56–67].

С 2007 г. на кафедре ММТ под руководством проф. Чукина М.В. проводится комплекс научно-исследовательских работ, направленных на установление закономерностей формирования структуры и свойств ультрамелкозернистых (УМЗ) углеродистых сталей методами деформационного измельчения [68–72]. Под УМЗ мы понимаем поликристаллические материалы с размером зерен менее 1000 нм, свойства которых значительно отличаются от свойств крупнозернистых материалов, что определяет реальные возможности их практического применения в разнообразных отраслях науки и техники. Исследования были начаты под руководством Чукина М.В. и Копцевой Н.В. при участии сотрудников Института физики перспективных материалов ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», которые оказали существенную помощь в осуществлении равноканального углового прессования (РКУП), одного из наиболее эффективных методов деформационного получения УМЗ структуры с размером зерна менее 1000 нм.

Копцевой Н.В. были доказаны феноменологические особенности структурных превращений в углеродистой конструкционной стали при деформационном измельчении зерна до размера

200–500 нм методом РКУП, выявлено влияние на них предварительной термической обработки и последующих деформационного и термического воздействий [71, 77, 79]. Определен механизм влияния структурообразования в углеродистых конструкционных сталях на механические свойства, формирующиеся в процессе РКУП и при последующих деформационно-термических воздействиях, которые характеризуются высоким уровнем прочностных характеристик при сохранении удовлетворительных пластических характеристик и ударной вязкости [78–80]. Раскрыты специфические особенности структурных превращений и механизма рекристаллизации при нагреве УМЗ низко- и среднеуглеродистой стали, объясняющие высокую стабильность ее структуры и свойств при термическом воздействии [81]. Эти результаты вносят вклад в расширение представлений металловедения о фазово-структурных превращениях в сталях при внешних воздействиях и о влиянии структуры на их свойства.

В качестве способа формирования УМЗ структуры материала был разработан метод равноканальной угловой свободной протяжки, реализация которого позволила управлять свойствами металлов в условиях непрерывности технологического процесса изготовления проволоки [69–72].

Полученные результаты показали возможность использования РКУП для получения в дешевых нелегированных сталях свойств, характерных для легированных сталей после упрочняющей термической обработки, для пластификации стали и успешного проведения последующей холодной пластической деформации с формированием высоких прочностных характеристик продукции. Была создана база данных, зарегистрированная в государственном реестре, позволяющая прогнозировать комплекс механических свойств УМЗ сталей и обеспечивающая накопление и подготовку исходных данных для создания новых технологических процессов с использованием методов интенсивной пластической деформации (ИПД) при производстве различных видов металлопродукции.

Внедрение результатов исследований позволяет значительно расширить класс конструкционных материалов для изготовления металлических изделий, обладающих повышенными прочностными свойствами, что имеет большое значение для металлургии и машиностроения и приносит существенный экономический эффект.

Эти работы получили развитие в настоящее время: с использованием физического моделирования на современном комплексе Gleeble 3500 в МГТУ исследуется возможность деформационного измельчения и получения УМЗ структуры углеродистой стали методами высокоскоростной и многоцикловой горячей пластической

деформации [69–81].

Барышниковым М.П. разработан и внедрен новый подход к регламентации поверхностного слоя металлических изделий, заключающийся в рассмотрении зоны контактирования двух поверхностей как некоторой некомпактной пористой среды, где можно выделить две основные области: материал и пустое пространство. Применение такого подхода при рассмотрении процессов контактирования поверхностей позволяет использовать для моделирования и прогнозирования теоретические закономерности и математический аппарат, известные в механике некомпактных сред и порошковой металлургии [82, 83]. Барышниковым М.П. предложена методика прогнозирования механических свойств и напряженно-деформированного состояния (НДС) в процессах обработки давлением стальных заготовок с различными структурными неоднородностями (неметаллические включения, газовые поры, направленная структура, вследствие неоднородности деформации). Методика основана на представлении металлов, как некомпактной среды, и реализована методами конечно-элементного и аналитического математического моделирования [84–85].

В основе наиболее распространенных программных пакетов по расчету процессов ОМД лежит механика сплошных сред. Математическая модель процесса деформации металла, представленная системой двадцати девяти дифференциальных уравнений, была создана с использованием некоторых упрощений, что влечет за собой рост погрешности результата вычислений. Ввиду сложности аналитического решения системы двадцати девяти дифференциальных уравнений применяют численные методы, самым распространенным из которых является метод конечных элементов. Применение численных методов, в свою очередь, также способствует увеличению погрешности вычислений.

В 1928 г. появилась фундаментальная работа Куранта, Фридрихса и Леви, посвященная численному решению дифференциальных уравнений в частных производных [86]. Интерес авторов заключался в использовании конечно-разностных методов решения дифференциальных уравнений как инструмента математики. Дискретизируя дифференциальные уравнения, доказывая сходимости дискретной системы к дифференциальной и, наконец, устанавливая существование решения дискретной системы алгебраическими методами, они доказывали теоремы существования и единственности решений для эллиптических, гиперболических и параболических дифференциальных уравнений. В этой работе было также получено и объяснено знаменитое необходимое условие устойчивости Куранта–Фридрихса–Леви, которое в современной терми-

нологии гласит, что число Куранта должно быть меньше единицы. Этот подход является частным случаем клеточных автоматов [87]. В плане точности модели динамики клеточные автоматы конкурентоспособны, по крайней мере, с точки зрения их вычислительной эффективности.

Клеточные автоматы являются дискретными динамическими системами, эволюция которых полностью определяется в рамках локальных зависимостей, что также свойственно большому классу непрерывных динамических систем, определенных уравнениями в частных производных. Клеточный автомат в каком-то смысле подобен физическому понятию «поля». Если представить клеточный автомат как своеобразный мир, где пространство расчерчено равномерной сеткой, каждая клетка (ячейка) которой характеризуется конечным количеством определенных параметров, время представлено последовательностью тактов, а законы мира представлены конечной таблицей переходов состояний для всех ячеек в зависимости от состояний соседних ячеек, то эта система достаточна для реализации сложных структур и явлений. Необходимо также отметить достоинство клеточных автоматов в общей парадигме параллельных вычислений [87].

Первой нашей попыткой создать модель реальной среды была система подвижных клеточных автоматов [88]. Среда представляла собой конечное количество элементарных элементов, взаимодействующих друг с другом по некоторому закону. В список параметров, характеризующих каждый элемент, входили координаты центра масс, масса и компоненты скорости. Варьируя закон взаимодействия элементов, можно было изменять свойства среды. Но эта система имела ряд недостатков, в частности, потребность в гигантской вычислительной мощности ПК, поскольку приходилось рассчитывать взаимодействия каждого элемента с каждым, а также количество тактов было слишком велико.

Вторая модель представляет собой классический клеточный автомат. Плоскость разделена на элементарные квадратные ячейки, а время, в свою очередь, – на такты.

В построенной нами модели рассматривается абстрактное возмущение, распространяющееся от источника по заданной области. Это отражает наиболее общий подход к моделированию физических взаимодействий в среде.

Обобщающий подход открывает широкие перспективы для моделирования процессов ОМД. В этом случае возмущением может быть изменение положения материальной точки, скорость материальной точки, сила, напряжения, деформации. Клеточно-автоматная модель открывает широкие перспективы для разработки эффективных программ расчета НДС заготовки в

процессе обработки давлением [88, 89].

В последние годы в вузе интенсивно развивается теория качества в рамках научной школы «Разработка и развитие теории квалиметрии и управления качеством продукции и производственных процессов» [90–102]. Рубиным Г.Ш. предложены основы функционально-целевого анализа [103–109]. Разработано понятие «функция объекта» (изделия, процесса), основанное на фундаментальных представлениях о взаимодействиях в физике. Определены три функции изделий, которые существенны для оценивания метизов: транспортная, монтажная и эксплуатационная. Обоснован и определен период существования объекта оценивания, в котором он выполняет потребительские функции. Этот период предложено назвать потребительской фазой. Разработан метод анализа структуры качества объекта, основанный на анализе функций, выполняемых при его потреблении. Исследователями МГТУ реализуется системный подход к комплексной оценке качества. Определён комплекс требований к операции свёртки, уточняющий известные ранее и опирающийся на положения логики относительных оценок. Введено понятие «акселерация оценок при свёртке», отражающее свойство эмерджентности в системах. Дано его математическое определение. Предложены функции свёртки, удовлетворяющие обоснованному в работе комплексу требований.

Мы считаем весьма продуктивным и разрабатываем процессный подход к оценке результативности технологического процесса. Разработаны понятия и методы локальной, глобальной и комплексной результативности многооперационного процесса производства, основанные на функциональном подходе к оценке технологического процесса, и методы их оценки, а также новые методы совершенствования технологических процессов с целью получения заданного качества метизов, повышения результативности технологического процесса.

Разработаны методы оценки требований к заготовке на основе нечёткого моделирования для получения требуемого качества метизов в заданном технологическом процессе и метод факторного анализа результативности технологического процесса, позволяющий оценивать потенциальные возможности операций для повышения результативности процесса.

Разработан функциональный метод анализа качества витых изделий, отличающийся наиболее полным учётом требований потребителя к кабелю. Определены понятия «функция изделия» и «свойство изделия». Методом функционального анализа разработана структура качества геофизического кабеля, отличающаяся сетевым строением. Анализ структуры свойств изделия

позволил выявить новое потребительское свойство геофизического кабеля – «жесткость», определяемое количественным показателем «осевая жесткость».

Разработана номенклатура показателей, характеризующая эффективность процесса производства шаровых пальцев, включающая комплекс требований потребителя к качеству продукции и специальные требования к технологическому процессу. Разработана методика оценки технологической эффективности процессов производства шаровых пальцев, основанная на вычислении комплексной оценки с учётом свойства акселерации комплексной оценки.

Предложен комплексный показатель результативности технологического процесса производства высокопрочной арматуры железобетонных шпал (ЖБШ), формирующийся на основе глобального и локального показателей процесса, и метод его анализа, позволивший определить технологические резервы для достижения заданного уровня потребительских свойств готовой продукции.

На основе разработанной методики нечёткого моделирования технологического процесса получены математические модели пооперационного изменения прочностных и пластических свойств заготовки для производства самонарезающих винтов на этапе подготовки металла к холодной объемной штамповке [103–109].

Корчуновым А.Г. предложена методология разработки и применения математических моделей с элементами нечеткой логики для управления показателями качества металлических изделий в процессах их формирования и технологической наследственности при разработке новых и совершенствовании действующих технологий метизного производства [110–115]. Формализована процедура описания параметров управления процессами обработки, параметров состояния и показателей качества металлических изделий нечеткими и лингвистическими переменными. Разработана последовательность структурной и параметрической идентификации математических моделей с элементами нечеткой логики управления показателями качества продукции [110–112]. Сформулированы принципы анализа неблагоприятных наследственных связей в процессах формирования качества продукции, предложены и разработаны технологические мероприятия, направленные на подавление их развития или устранение с учетом специфики взаимодействия методов обработки различной физической природы в технологиях метизного производства [113–115].

В рамках научной школы «Разработка и развитие теории квалиметрии и управления качеством продукции и производственных процессов» Голубчиком Э.М. предложены научно обоснованные подходы к адаптивному оперативному управ-

лению качеством металлопродукции применительно к многовариантным технологическим системам [116–119]. Сформированы теоретические положения и построены различные модели и алгоритмы, реализующие методы оперативного технологического воздействия на показатели качества металлопродукции в процессе ее изготовления при возможной многовариантности технологической системы, обеспечивающие гарантированное достижение желаемого потребителем уровня качества. Такой подход позволяет предприятию-производителю наиболее эффективным образом использовать имеющиеся у него ресурсы для повышения своих конкурентных преимуществ, исключая затратные методы «проб и ошибок» при разработке технологий производства новых видов продукции. Учеными вуза в кооперации со специалистами-практиками проводятся комплексные исследования по применимости данной методологии при освоении инновационной металлопродукции, обладающей глубокой степенью переработки в условиях таких предприятий, как ОАО «ММК», ОАО «Мотовилихинские заводы» (г. Пермь).

Повышение качества продукции является важным фактором, определяющим конкурентоспособность продукции. Это обеспечивается путем выстраивания надежных отношений между потребителями и производителями. Особую актуальность приобретают проблемы повышения качества продукции на современном этапе интеграции российской экономики в мировое экономическое пространство. Это требует решения ряда задач, среди которых совершенствование системы стандартизации на всех уровнях производственных отношений. К настоящему времени накоплен багаж знаний, разработаны принципы и методы стандартизации, нормативная база стандартизации насчитывает сотни нормативных документов. Однако следует отметить отсутствие научных основ стандартизации; зачастую нормы, регламентируемые в стандартах, не соответствуют современному уровню развития техники и технологий; разработка, принятие и утверждение стандартов занимает довольно длительный промежуток времени; практически не действует заявляемый принцип опережающей стандартизации. Все это сдерживает быстрое внедрение современных достижений науки в действующее производство [120].

О качестве металлопродукции судят, прежде всего, по степени соответствия показателей качества требованиям нормативно-технической документации (НТД). Система обязательных требований в металлургии представлена более чем 20000 нормативных документов, в основном советского периода. Она неудобна для применения, часто имеет рамочный характер, содержит завышенные, дублирующие и избыточные требова-

ния, не гармонизирована с мировой практикой. Общероссийский каталог стандартов Ростехрегулирования содержит перечень 1855 государственных стандартов по разделу 77 «Металлургия». Многие ГОСТы устарели и не отвечают новым требованиям и принципам стандартизации, не отражают в полной мере рыночных отношений. Кроме того, действующие в настоящее время отраслевые стандарты в большинстве характеризуются несистематизированностью, значительной долей устаревших требований, отсутствием программы развития.

Стандартизация характеризуется тем, что имеет объект, в качестве которого выступают предметы, явления, процессы, повторяющиеся в виде различных вариантов, причем выбранный из этого множества вариант должен быть оптимальным. Поиск оптимального варианта должен производиться на научной основе с использованием математической статистики, теории вероятностей, комбинаторной математики и т.д. Стандартизация предполагает определенный набор действий: выбор или разработку оптимальных решений, их узаконивание и оформление по установленному порядку, их практическое применение в практике по строго регламентированным правилам, т.е. стандартизацию можно рассматривать как систему приемов трудовой деятельности, как метод работы.

Основными задачами стандартизации в области металлургического производства в настоящее время являются: упорядочение (систематизация) информации в НТД; унификация количества НТД на определенный вид продукции; разработка методических основ с учетом внедрения инноваций и модернизации металлургического производства, т.е. стандартизация должна быть действительно опережающей.

В МГТУ усилиями ученых Рубина Г.Ш., Поляковой М.А., Чукина М.В. и др. [120, 121] складывается новая наука о приёмах и методах разработки стандартов на промышленную продукцию. Для обозначения этой науки предложено

использовать греческое слово *протополо* – стандарт. Следуя традициям словообразования русского языка – соединять названия предмета изучения с окончанием «-логия», соответствующую науку о стандартизации называем «Протипология». Предметом данной науки является разработка методов согласования требований потребителя и возможностей изготовителя продукции. Этапами разработки стандартов являются:

- 1) разработка требований потребителя как набора свойств и характеризующих их измеряемых показателей;
- 2) установление соответствия между потребительскими свойствами и свойствами изделия,

контролируемыми изготовителем продукции;

3) максимальное сближение позиций изготовителя и потребителя и разработка стандарта как оптимального компромисса позиций сторон.

Наши научно-практические разработки последних лет доказывают перспективность и возможность внедрения нанотехнологий в действующие технологические процессы производства металлоизделий различного назначения. Результатом практической реализации фундаментальных исследований в области формирования наноструктуры в углеродистых сталях при различных видах ИПД стали разработанные технологические процессы получения различных видов метизной продукции. Использование углеродистой стали с УМЗ структурой для производства различных видов металлоизделий (проволока, машиностроительный крепеж, высокопрочная арматура для ЖБШ и др.) позволяет не только получить характерный для данного структурного состояния комплекс прочностных и пластических свойств, но также в значительной степени расширяет области применения, приводит к экономии материальных и энергетических ресурсов.

Одним из примеров последовательной реализации предлагаемых этапов разработки стандартов, связанных с отсутствием нормативной базы для производства металлоизделий из сталей с УМЗ структурой, является разработанная нами технология производства высокопрочных болтов М16 из углеродистых сталей 20 и 45 после РКУП методом холодной высадки. Результаты испытаний показали, что использование 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. Согласно общей методологии протипологии в настоящее время реализованы первые два этапа разработки стандарта. В ходе первого этапа проведен анализ требований потребителей в получении высокопрочного крепежа с высокими значениями механических свойств. При этом немаловажную роль играет возможность замены легированных марок стали на углеродистые при сохранении требуемого уровня механических свойств. На втором этапе проведен комплекс теоретико-экспериментальных работ по установлению такой возможности. В настоящее время остро стоит необходимость разработки стандарта, либо разработки изменений в действующие нормативные документы, открывающие перспективы производства данного вида метизной продукции из углеродистых сталей с УМЗ структурой [11, 57–61, 63, 65, 66, 120, 121].

В 2010–2012 гг. специалистами ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-

МЕТИЗ» и учеными МГТУ реализован совместный проект по созданию высокотехнологичного производства высокопрочной арматуры диаметром 9,6 мм для ЖБШ высокоскоростных и тяжело нагруженных магистралей, поддержанный Министерством образования Российской Федерации. Реализация проекта была направлена на достижение значимой научной цели, заключающейся в формировании наноструктурированного состояния высокоуглеродистых сталей в объемных длинномерных изделиях [11, 57–61, 65, 66, 120, 121]. При реализации технологии первый этап разработки нормативной документации на этот вид металлопродукции реализован в виде требований ОАО «РЖД» как основного потребителя. На втором этапе учеными МГТУ и специалистами ОАО «ММК-МЕТИЗ» был проведен колоссальный объем экспериментальных исследований по установлению влияния режимов каждой операций технологического процесса на конечные потребительские свойства арматуры. В результате проведенных работ в действующие в ОАО «ММК-МЕТИЗ» технические условия ТУ 0930-011-01115863-2008 были внесены изменения в части расширения класса арматуры 1450К, а также нового вида исполнения: прутки со свободной длиной без резьбы на концах.

Несмотря на то, что по своим эксплуатационным характеристикам металлоизделия, получаемые из углеродистых сталей с УМЗ структурой, не уступают, а порой превосходят свои крупнозернистые аналоги, промышленное внедрение данных технологических процессов сдерживается отсутствием НТД. Основываясь на предлагаемом подходе, основным направлением развития стандартизации на современном этапе является использование основных положений протипологии для разработки стандартов, прежде всего отраслевого значения. Это будет являться базой не только для скорейшего внедрения, например, нанотехнологий в действующее промышленное производство, но станет значительным шагом вперед на пути адаптации требований отечественных стандартов мировым аналогам.

Кафедра ММТ МГТУ является практически единственной в России, выпускающей метизников, тесно сотрудничает с предприятиями этой отрасли в сфере научной деятельности. В настоящее время ведущим ученым-метизником, профессором кафедры Харитоновым В.А. проводится комплекс исследований, направленных на повышение конкурентоспособности проволоки и канатов. Под его руководством защищено 12 кандидатских диссертаций, посвященных решению актуальных проблем метизной подотрасли страны [12, 122–125]. В.А. Харитоновым предложен пакет методик проектирования: калибровок валков станов сортовой холодной прокатки и роликовых волок; ресурсосберегающих технологических процессов изготовления проволоки различного

назначения; параметров периодического профиля холоднодеформированной проволоки из низко- и высокоуглеродистых сталей и инструмента для его нанесения; маршрутов волочения проволоки и выбора параметров волочильного инструмента на основе оценки геометрической скоростной и контактной неравномерности деформации.

Разработана теория калибрующего пластического обжатия прядей и канатов гладких и периодического профиля в роликовых волоках и модель расчета параметров структурообразования при волочении проволоки в роликовых волоках радиально-сдвиговой деформации.

Разработаны, прошли опытное промышленное опробование, внедрены в производство на промышленных предприятиях (ОАО «БМК», ОАО «ММК-МЕТИЗ», ЗАО «Уралкорд» и др.) новые технологии производства проволоки круглой передельной из высоколегированных и легких сплавов; проволоки фасонного и периодического профиля; из легированных, низко- и высокоуглеродистых сталей, проволоки высокоуглеродистой под металлокорд. Работы проводились совместно с ведущими научно-исследовательскими институтами: ВНИИМетиз (г. Магнитогорск), ВИЛС (г. Москва), НИИЖБ (г. Москва), ВНИИЖелезобетон (г. Москва) и др. [12, 122–125].

Список литературы

1. Стеблянюк В.Л. Создание технологий получения биметаллической проволоки и покрытий на основе процессов, совмещенных с пластическим деформированием: дис. ... д-ра техн. наук / Стеблянюк Валерий Леонтьевич. Магнитогорск, 2000. 300 с.
2. Стеблянюк В.Л., Ситников И.В. Очистка и активация поверхности металлов перед плавкой и нанесением покрытий // «Черметинформация»: Обзорная информация. М., 1991. 22 с.
3. Использование чугуна стружки в качестве сырья для производства порошков / А.А. Гостев, Г.С. Гун, М.В. Чукин, И.Ю. Мезин и др. // Новые технологии получения слоистых материалов и композиционных покрытий: материалы междунар. науч.-техн. конф., г. Сочи, 5–8 октября 1992. Сочи, 1992.
4. Гун Г.С., Мезин И.Ю. Production of Duroble Materials and Products on the basis of steel carbide chromium // Advances in Materials & Processes international conference & exhibition, 16–19 февраля 1992. Бомбей, Индия, 1992.
5. НПО «БелМаг» – 10 лет движения вперед / Гун И.Г., Михайловский И.А., Осипов Д.С. и др. Магнитогорск: Магнитогорский Дом Печати, 2007. 104 с.
6. Аркулис Г.Э. Совместная пластическая деформация разнородных металлов. М.: Металлургия, 1964. 272 с.
7. Аркулис Г.Э., Дорогобид В.Г. Теория пластичности. М.: Металлургия, 1987. 352 с.
8. Производство стальной проволоки: монография / 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. Магнитогорск: МГТУ, 2005. 543 с.
9. Стальная проволока: монография / Белалов Х.Н., Клековкина Н.А., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Полякова М.А. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 689 с.
10. Кулеша В.А., Клековкина Н.А., Белалов Х.Н. Изготовление высококачественных метизов (научный и практический опыт Белорецкого металлургического комбината): коллективная монография. Магнитогорск: Магнитогорский Дом Печати, 1999. 328 с.
11. Производство высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения / М.В. Чукин, А.Г. Корчунов, В.А. Бакинов, М.П. Барышников, Г.С. Гун, Д.К. Долгий, Ю.Ю. Ефимова, В.М. Колокольцев, Н.В. Копцева, К.Ю. Куранов, В.Н. Лебедев, И.Ю. Мезин, М.А. Полякова, В.В. Чукин; под общ. ред. М.В. Чукина. М.: Металлургиздат, 2014. 276 с.
12. Харитонов В.А. Направления развития технологических процессов производства проволоки // Метизное производство в XXI веке: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск, 2001. С. 4–15.
13. Мезин И.Ю. Развитие теории и технологии формирования металлоизделий холодным прессованием структурно-неоднородных материалов: дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск, 2001. 360 с.
14. Мезин И.Ю. Формирование металлоизделий из структурно-неоднородных материалов: монография. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2000. 155 с.
15. Эффективные способы глубокой переработки металла на базе магнитогорских металлургических предприятий / Гун Г.С., Гун И.Г., Мезин И.Ю. и др. // Новые материалы и технологии НМТ-98: материалы Всерос. науч.-техн. конф. М.: Изд-во «ЛАТМЭС», 1998. С. 72.
16. Ryabkov V.M., Gun G.S., Mezin I.Y. The principles of developing steel – carbide chrome composite powder materials by cold deformation of porous ingots // International Conference "Materials by Powder Technology – PTM 93", March 23–26, 1993, Дрезден (ФРГ).
17. Гун Г.С., Мезин И.Ю. Исследование контактных явлений при развитии консолидации в порошковом материале // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Новые технологии получения слоистых и порошковых материалов, композиционных покрытий». Сочи, 1993. С. 115–116.
18. Теоретические и технологические основы производства порошков и изделий регулируемого состава на основе железа / Г.С. Гун, И.Ю. Мезин, И.Г. Гун и др. // Материалы Российской межвуз. науч.-техн. конф. «Фундаментальные проблемы металлургии». Екатеринбург: УГТУ, 1995. С. 91.
19. Получение порошковых материалов и изделий (Опыт работы завода «Марс»): монография / Г.С. Гун, А.А. Гостев, И.Ю. Мезин, Е.Г. Козодаев, И.Ф. Тимошенко, И.Г. Гун. Магнитогорск, 1993. 112 с.
20. Калибровка профиля петли двери легкового автомобиля ВАЗ / Поляков М.Г., Никифоров Б.А., Гун Г.С. и др. // Теория и практика производства стальных фасонных профилей: сб. науч. трудов. Магнитогорск: МГМИ, 1971. Вып. 106.
21. Калибровка таврового профиля для тормозных колодок автомобиля «Москвич» / Гун Г.С., Богатырев Ю.П., Кандауров Л.Е. и др. // Теория и практика производства стальных фасонных профилей: сб. науч. трудов. Магнитогорск: МГМИ, 1974. Вып. 140.
22. Поле скоростей при прокатке тавровых профилей в трехвалковых калибрах / Гун Г.С., Рубин Г.Ш., Богатырев Ю.П. и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. 1979. № 4.
23. Гун Г.С., Гостев А.А., Гун И.Г. Концепция мини-завода порошковой металлургии с использованием в качестве сырья чугуна стружки // Новые технологии получения слоистых порошковых материалов, композиционных покрытий: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Сочи, 7–10 сентября 1993. Сочи, 1993.
24. Выбор материала и разработка технологии изготовления тормозных элементов дискового тормоза легковых автомобилей методом порошковой металлургии / Г.С. Гун, И.Ю. Мезин, О.Б. Толмачева, И.Г. Гун, А.А. Гостев, Е.Г. Козодаев и др. // Состояние и перспективы развития научно-технического потенциала Южно-Уральского региона: материалы Межгосуд. науч.-техн. конф. Магнитогорск: МГМИ, 1994. С. 124.
25. Использование порошков из чугуна стружки Магнитогорского металлургического комбината в антифрикционных материалах / Г.С. Гун, И.Ю. Мезин, О.Б. Толмачева, И.Г. Гун, А.А. Гостев, Е.Г. Козодаев и др. // Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. Г.С. Гуна. Магнитогорск: МГМА, 1994. С. 54–65.
26. Развитие машиностроительного производства в условиях

- АО ММК / Г.С. Гун, А.А. Гостев, В.А. Куц, В.Е. Хребто, И.Г. Гун // Труды второго конгресса прокатчиков. М., 1998. С. 334-336.
27. Гун И.Г., Михайловский И.А. Способ чистовой обработки неполных сферических поверхностей обкатыванием // Технология машиностроения. 2001. № 4. С. 12-15.
28. Совершенствование режимов планетарной обкатки головок шаровых пальцев на основе анализа микротопографии поверхности с целью повышения качества изделий / И.А. Михайловский, В.В. Сальников, Д.С. Осипов, И.Г. Гун // Вестник Череповецкого государственного университета. 2011. № 1 (т. 2). С. 39-44.
29. Сальников В.В., Михайловский И.А., Гун И.Г. Моделирование процесса разрушения шарового шарнира передней подвески автомобиля при осевом нагружении // ААИ. 2011. № 2. С. 51-53.
30. Гун И.Г., Михайловский И.А. Анализ и совершенствование процесса планетарной обкатки головок шаровых пальцев // Совершенствование технологий производства и конструкций автомобильных компонентов: сб. науч. тр. М.: ИД «ААИ-ПРЕСС», 2003. С. 119-123.
31. Михайловский И.А., Гун И.Г., Лапчинский В.В. Методика проведения и обработка результатов объединенных испытаний верхних шаровых пальцев передней подвески автомобилей ВАЗ 2101-2107 // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2004. № 4 (8). С. 43-50.
32. Михайловский И.А., Гун И.Г., Ясаков Ю.М. и др. Стенд для испытаний шаровых шарниров: пат. 2263889 РФ.
33. Гун И.Г., Железков О.С., Михайловский И.А. Способ обработки неполной сферической головки шарового пальца поверхностным деформированием: пат. 2162785 РФ. Опубл. 10.02.2001. Бюл. № 4.
34. Гун И.Г., Артюхин В.И., Калмыков Ю.В., Левченко П.Е., Сальников В.В., Гун Е.И. Шаровой шарнир: пат. 2475652 РФ, МКИ F16C 11/06. Опубл. 20.02.2013. Бюл. № 5.
35. Гун И.Г., Артюхин В.И., Гун Е.И., Калмыков Ю.В., Сальников В.В., Куцпендик В.И. Шаровой шарнир рулевого управления: пат. 2501995 РФ, МКИ F16C 11/06, B62D 7/16. Опубл. 20.12.2013. Бюл. № 35.
36. Шаровые шарниры шасси: совершенствование конструкций, технологий и методов оценки качества: монография / И.А. Михайловский, И.Г. Гун, Е.И. Гун, Е.Г. Касаткина. Магнитогорск: Изд-во: Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 201 с.
37. Разработка, моделирование и совершенствование процессов производства шаровых шарниров автомобилей / И.Г. Гун, И.А. Михайловский, Д.С. Осипов, В.И. Куцпендик, В.В. Сальников, Е.И. Гун, Ал.В. Смирнов, Ар.В. Смирнов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 52-57.
38. Разработка процесса планетарно-поворотной обкатки / И.А. Михайловский, В.И. Куцпендик, Е.И. Гун, И.Г. Гун, В.В. Сальников // Металлургические процессы и оборудование. 2014. № 1. С. 39-45.
39. Разработка, моделирование и исследование процессов ОМД при производстве шаровых шарниров автомобилей / И.Г. Гун, Д.С. Осипов, И.А. Михайловский, Ю.В. Калмыков, В.И. Куцпендик, В.В. Сальников, Е.И. Гун // Инновационные технологии обработки металлов давлением: сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. М.: НИТУ «МИСиС», 2011. С. 482-487.
40. Развитие процессов ОМД в производстве автокомпонентов / В.И. Куцпендик, И.Г. Гун, И.А. Михайловский, Д.С. Осипов, В.В. Сальников, Е.И. Гун, Ар.В. Смирнов, Ал.В. Смирнов // XIV International Scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: a collective monograph edited by Henryk Dya, Anna Kawalek. Series: monographs No 31. Czestochowa, 2013. P. 309-316.
41. Чукин М.В. Развитие теории и оптимизация процессов технологического и эксплуатационного деформирования изделий с покрытиями: дис. ... д-ра техн. наук / Чукин Михаил Витальевич. Магнитогорск, 2001. 398 с.
42. Упрочняющие и восстанавливающие покрытия / Г.С. Гун, В.В. Кривошапов, М.В. Чукин, В.С. Адамчук, А.М. Цун. Челябинск: Металлургия. Челябин. отд-ние, 1991. 160 с.
43. Слоистые композиционные покрытия в метизной промышленности. Т. 1 / Е.И. Кузнецов, М.В. Чукин, М.П. Барышников, О.В. Семенова. Магнитогорск: ПМП «МиниТип», 1997. 96 с.
44. Слоистые композиционные покрытия в метизной промышленности. Т. 2 / Е.И. Кузнецов, М.В. Чукин, М.П. Барышников, О.В. Семенова. Магнитогорск: ПМП «МиниТип», 1997. 208 с.
45. Упрочнение прокатных валков напеканием чугуновых порошков / А.А. Гостев, М.В. Чукин, Г.С. Гун и др. // Пути развития машиностроительного комплекса Магнитогорского металлургического комбината: сб. науч. тр. / под ред. А.А. Гостева. Магнитогорск: МГМА, 1996. С. 168-171.
46. Гун Г.С., Чукин М.В., Барышников М.П. Кинематика процесса волочения двухслойных композиций с полимерной составляющей // Материалы 5 Междунар. конф. «Пленки и покрытия». СПб., 1998. С. 5-8.
47. Чукин М.В. Развитие теории волочения проволоки с функциональными покрытиями // Материалы I Междунар. науч.-техн. конф. «Металлофизика и деформирование перспективных материалов». Самара, 1999. С. 36-37.
48. Гун Г.С., Чукин М.В. Оптимизация процессов технологического и эксплуатационного деформирования изделий с покрытиями: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. 323 с.
49. Гун Г.С. Совершенствование технологии производства высокоточных профилей оптимизацией по комплексному критерию качества: дис. ... д-ра техн. наук: 18.09.1985 / Гун Геннадий Семенович. М., 1985. 276 с.
50. Гун Г.С. Управление качеством высокоточных профилей: монография. М.: Металлургия, 1984, 152 с.
51. Гун Г.С., Сторожев С.Б. Расчет комплексного показателя качества на примере оценки качества стальных фасонных высокоточных профилей // Стандарты и качество. 1978. № 1.
52. Гун Г.С. Метод комплексной оценки качества металлопродукции // Изв. вузов. Черная металлургия. 1982. № 8.
53. Комплексная оценка качества стальной канатной проволоки / Гун Г.С., Рубин Г.Ш., Пудов Е.А. и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. 1983. № 12.
54. Гун Г.С. Теоретическое обоснование комплексной оценки качества металлопродукции // Известия АН СССР. Металлы. 1983. № 4.
55. Гун Г.С. Критерии управления качеством процесса изготовления фасонных профилей // Известия АН СССР. Металлы. 1984. № 2.
56. Михайловский И.А. Повышение результативности производства шаровых шарниров на основе регламентации комплекса требований к качеству изделий и материалов: дис. ... д-ра техн. наук / Михайловский Игорь Александрович. Магнитогорск, 2011. 310 с.
57. Высокопрочная арматура для железобетонных шпал нового поколения / С.Н. Ушаков, М.В. Чукин, Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, М.А. Полякова // Путь и путевое хозяйство. 2012. № 11. С. 25-28.
58. Перспективы производства высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения на основе термомеханического наноструктурирования / М.В. Чукин, Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, М.А. Полякова // Черная металлургия: Бюл. Черметинформации. 2012. Вып. 4. С. 100-105.
59. Перспективы производства высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения на основе термомеханического наноструктурирования / М.В. Чукин, Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, М.А. Полякова // Неделя металлов в Москве: сб. тр. конф., 15-18 ноября 2011. М.: ВНИИМЕТМАШ, 2012. С. 79-87.
60. Chukin M., Gun G., Emaleeva D. Производство высокопрочной наноструктурированной арматуры для железобетонных шпал // XIII International Scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering: a collective monograph edited by Henryk Dya, Anna Kawalek. Series: monographs No 24. Czestochowa, 2012. pp. 327-332.
61. Перспективы производства высокопрочной стальной арматуры из высокоуглеродистых марок стали / М.В. Чукин, Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, М.А. Полякова // Черные металлы. 2012 декабрь, С. 8-15.
62. Организация малотоннажного производства наноструктури-

- рованных заготовок из многофункциональных сплавов со специальными свойствами / В.М. Колокольцев, М.В. Чукин, Г.С. Гун, Э.М. Голубчик, А.С. Кузнецова // Труды IX конгресса прокатчиков. Т. 1. Череповец, 2013. С. 248-251.
63. Исследование влияния технологических режимов на механические свойства и микроструктуру высокопрочной арматуры диаметром 9,6 мм / М.В. Чукин, Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, М.А. Полякова, Н.В. Копцева, Д.К. Долгий, А.В. Лысенин // IX International Scientific conference "New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering: a collective monograph edited by Henryk Dyja, Anna Kawalek. Series: monographs No 31. Czestochowa, 2013. P. 367-373.
64. Реализация проекта малотоннажного производства наноструктурированных заготовок из многофункциональных сплавов со специальными свойствами / М.В. Чукин, Г.С. Гун, Э.М. Голубчик, А.С. Кузнецова, Н.Ю. Бухвалов, К.С. Пустовойт // XIV International Scientific conference "New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering: a collective monograph edited by Henryk Dyja, Anna Kawalek. Series: monographs No 31. Czestochowa, 2013. P. 374-378.
65. Nanodimensional in high carbon steel structural part formation by thermal and deformation processing / Chukin M.V., Korchunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V. // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2013. № 5 (45). P. 33-35.
66. Перспективы производства высокопрочного крепежа из заготовок из углеродистых сталей с ультрамелкозернистой структурой / М.В. Чукин, М.А. Полякова, Г.Ш. Рубин, Н.В. Копцева, Г.С. Гун // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. № 1. С. 39-44.
67. Исследование физико-механических свойств и структуры высокопрочных многофункциональных сплавов инварного класса нового поколения / М.В. Чукин, Э.М. Голубчик, Г.С. Гун, Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, Д.М. Чукин, А.Н. Матушкин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 43-48.
68. Исследование эволюции структур наносталей 20 и 45 при критических степенях пластической деформации / М.В. Чукин, Р.З. Валиев, Г.И. Рааб, Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 4 (20). С. 89-93.
69. Исследование формирования субмикроструктурной структуры поверхностного слоя стальной проволоки с целью повышения уровня ее механических свойств / Г.С. Гун, М.В. Чукин, Д.Г. Емалеева, Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, М.П. Барышников // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 3 (19). С. 84-86.
70. Формирование субмикроструктурной структуры поверхностного слоя стальной проволоки методом РКУ-протяжки / Г.С. Гун, М.В. Чукин, Д.Г. Емалеева, Н.В. Копцева, В.В. Чукин, М.П. Барышников // Труды седьмого конгресса прокатчиков. М., 2007. Т. 1. С. 364-368.
71. Дифракционный электронно-микроскопический анализ субмикроструктурной и нанокристаллической структуры конструкционных углеродистых сталей после равноканального углового прессования и последующего деформирования / М.В. Чукин, Н.В. Копцева, Р.З. Валиев, И.Л. Яковлева, G. Zrník, T. Kovarik // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. № 1 (21). С. 31-37.
72. Наноструктурирование сталемедной биметаллической проволоки / Ю.Ю. Ефимова, Н.В. Копцева, В.В. Чукин, Д.Г. Емалеева, Т.А. Зубкова, О.А. Никитенко // Материалы 66-й науч.-техн. конф. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. Т. 1. С. 49-52.
73. Влияние предварительной термической обработки на структуру и свойства углеродистых конструкционных сталей 20 и 45, наноструктурированных методом равноканального углового прессования / Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, М.В. Чукин, М.А. Полякова // Черные металлы (пер. с нем.). 2010, июль. С. 14-19.
74. Формирование структуры и механических свойств углеродистой конструкционной стали в процессе наноструктурирования методом равноканального углового прессования / Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, М.П. Барышников, О.А. Никитенко // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 7. С. 11-17.
75. Criterion estimation of severe plastic deformation efficiency from the position of their influence on the carbon steel structures evolution / M.V. Chukin, N.V. Koptseva, J.J. Efimova, O.A. Nikitenko, M.A. Polyakova // CIS Iron and Steel Review. 2010. P. 28-31.
76. Механические свойства углеродистой конструкционной стали с ультрамелкозернистой структурой / М.В. Чукин, Н.В. Копцева, О.А. Никитенко, Ю.Ю. Ефимова // Черные металлы. Спец. выпуск. 2011. С. 54-59.
77. Влияние температуры и длительности нагрева на термостабильность углеродистых конструкционных сталей с ультрамелкозернистой структурой, сформированной методом равноканального углового прессования / Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, М.П. Барышников, Д.А. Михоленко // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 8. С. 14-20.
78. Копцева Н.В., Михоленко Д.А., Ефимова Ю.Ю. Эволюция микроструктуры и свойств при нагреве ферритно-перлитных углеродистых конструкционных сталей с ультрамелкозернистой структурой, сформированной интенсивной пластической деформацией // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 9. С. 85-91.
79. Исследование структуры и свойств болтов, изготовленных из наноструктурированных углеродистых сталей / Ю.Ю. Ефимова, Н.В. Копцева, В.В. Чукин, М.А. Полякова, М.П. Барышников // Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. М.В. Чукина. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. № 38. С. 144-150.
80. Инновационный потенциал новых технологий производства метизных изделий из наноструктурных сталей / М.В. Чукин, Н.В. Копцева, М.П. Барышников, Ю.Ю. Ефимова, А.Д. Носов, Е.П. Носков, Б.А. Коломиец // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. № 2 (26). С. 64-68.
81. Копцева Н.В., Полякова М.А., Ефимова Ю.Ю., Кузнецова А.С., Мохнаткин А.В. Микроструктура и физико-механические свойства объемных ультрамелкозернистых материалов: Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2010620405 (29.07.2010); заяв. № 201062026 (07.06.2010); опублик. 20.12.2010. Бюл. ОБПБТ № 4 (75). С. 551.
82. Чукин М.В., Барышников М.П., Беляев А.О. Методика оценки коэффициента пропорциональности в процессах ОМД с применением средств объектно-ориентированного программирования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. № 4 (24). С. 76-79.
83. Чукин М.В., Барышников М.П., Беляев А.О. Подход к определению коэффициента трения в задачах обработки металлов давлением на основе представления области контакта как некомпактной среды // Изв. вузов. Черная металлургия. 2010. № 3. С. 25-28.
84. Барышников М.П., Чукин М.В., Бойко А.Б. Анализ программных комплексов для расчета напряженно-деформированного состояния композиционных материалов в процессах обработки давлением // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 4 (40). С. 72-74.
85. Моделирование процесса волочения проволоки с учетом неоднородности структуры в программном комплексе SIMULIA ABAQUS / М.П. Барышников, М.В. Чукин, Г.С. Гун, А.Б. Бойко // Пластическая деформация металлов. Днепрпетровск. 2014. С. 156-158.
86. Courant R., Friedrichs K., Lewy H. Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik // Mathematische Annalen. 1928. Т. 100. № 1. С. 32-74.
87. Тоффоли Т., Марголус Н. Машины клеточных автоматов: пер. с англ. М.: Мир, 1991. 280 с.
88. Рубин Г.Ш., Шишов А.А. Клеточно-автоматные модели деформируемой среды // Труды восьмого конгресса прокатчиков. Магнитогорск, 2010. С. 451-453.
89. Методологический подход к управлению качеством метизной

- продукции, основанный на нечетких множествах / Г.Ш. Рубин, Ф.Т. Вахитова, В.Н. Лебедев, Е.Н. Гусева, А.А. Шишов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. № 4 (28). С. 50–53.
90. Управление качеством продукции в технологиях метизного производства: монография / Корчунов А.Г., Чукин М.В., Гун Г.С., Полякова М.А. М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2012. 164 с.
91. 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.
92. Протипология – новый этап развития стандартизации метизного производства / Г.Ш. Рубин, М.А. Полякова, М.В. Чукин, Г.С. Гун // Сталь. 2013. № 10. С. 84–87.
93. Разработка теории квалиметрии производства металлоизделий / Г.С. Гун, М.В. Чукин, И.Г. Гун, А.Г. Корчунов, И.Ю. Мезин, Г.Ш. Рубин, Д.М. Закиров // Труды IX конгресса прокатчиков Т. 1. Череповец, 16–18 апреля 2013. Череповец, 2013. С. 237–244.
94. Квалиметрия в металлургии / Г.Ш. Рубин, Г.С. Гун, М.В. Чукин, А.Г. Корчунов // Качество в производственных и социально-экономических системах: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Курск, 2013. С. 185–189.
95. Разработка теории квалиметрии в металлургической отрасли / G.Sh. Rubin, G.S. Gun, M.V. Chukin, I.G. Gun, A.G. Korchunov // XIV International Scientific conference "New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering: a collective monograph edited by Henryk Dyja, Anna Kawalek. Series: monographs No 31. Czestochowa, 2013. P. 51–55.
96. Metallurgy qualimetry theory design and development / G.S. Gun, G.Sh. Rubin, M.V. Chukin, I.G. Gun, I.U. Mezin, A.G. Korchunov // Vestnik of Novos Magnitogorsk State Technical University. 2013. № 5 (45). P. 67–69.
97. Гун Г.С., Чукин М.В., Рубин Г.Ш. Управление качеством в метизном производстве // Металлургические процессы и оборудование / ООО «Технопарк Дон ГТУ «УНИТЕКС» (Донецк, Украина). 2013. № 4(34). С. 106–112.
98. Разработка и развитие теории квалиметрии металлургии / Г.С. Гун, Г.Ш. Рубин, М.В. Чукин, И.Ю. Мезин, А.Г. Корчунов, И.Г. Гун // Материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф. «Современные металлические материалы и технологии (СММТ'13)» (25–29 июня 2013 г., Санкт-Петербург). СПб., 2013.
99. Научно-педагогическая школа Магнитогорского государственного технического университета по управлению качеством продукции и производственных процессов / Г.С. Гун, И.Ю. Мезин, А.Г. Корчунов, М.В. Чукин, И.Г. Гун, Г.Ш. Рубин // Качество в обработке материалов. 2014. № 1. С. 5–8.
100. Генезис научных исследований в области качества металлопродукции / Г.С. Гун, И.Ю. Мезин, Г.Ш. Рубин, А.А. Минаев, А.Е. Назайбеков, Х. Дья // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 92–97.
101. Концептуальная модель ситуационного центра промышленного предприятия / М.Б. Гитман, К.С. Пустовойт, В.Ю. Столбов, С.А. Федосеев, Г.С. Гун // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 102–107.
102. 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.
103. Рубин Г.Ш. Квалиметрия метизного производства: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 167 с.
104. Рубин Г.Ш., Герасимова З.А., Вайсман Д.И. Расчет и анализ использования производственных мощностей метизной промышленности: монография. М.: Металлургия, 1985. 48 с.
105. Комплексная оценка эффективности процессов производства шаровых пальцев: монография / И.Г. Гун, Г.Ш. Рубин, В.В. Сальников и др. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. 133 с.
106. Об оценках пластического формоизменения / Г.С. Гун, А.И. Крылов, Г.Ш. Рубин и др. // Известия АН СССР. Металлы. 1976. № 6. С. 109–112.
107. Сравнение различных способов обработки металлов давлением по эффективности формоизменения / Г.Ш. Рубин, Г.С. Гун, Ю.П. Богатырев и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. 1980. № 5. С. 52–54.
108. Выбор эффективной технологии получения профилей повышенной точности для машиностроения / Г.Ш. Рубин, Г.С. Гун, Е.А. Пудов и др. // Изв. вузов. Машиностроение. 1981. № 5. С. 155–157.
109. Исследование процесса высадки двухфланцевых шпилей противоскольжения с использованием компьютерного моделирования / В.В. Андреев, Г.С. Гун, Г.Ш. Рубин, А.Г. Ульянов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. № 1 (21). С. 45–49.
110. Корчунов А.Г. Управление качеством метизной продукции на основе нечетких моделей описания технологической наследственности // Металлург. 2009. № 5. С. 50–53.
111. Korchunov A., Chukin M., Lysenin A. Methodology of developing mathematical models with fuzzy logic elements for quality indices control // Applied Mechanics and Materials Vol. 436 (2013). P. 374–381.
112. Корчунов А.Г., Лысенин А.В. Управление качеством метизной продукции в условиях неопределенности технологической информации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 3 (39). С. 43–45.
113. Корчунов А.Г. К вопросу обеспечения качества продукции в технологиях метизного производства // Металлург. 2008. № 10. С. 67–72.
114. Корчунов А.Г. Совершенствование методики управления качеством продукции в технологических процессах метизного производства // Производство проката. 2008. № 12. С. 8–13.
115. Корчунов А.Г. Методология управления показателями качества продукции в технологиях метизного производства на основе моделей с элементами нечеткой логики: дис. ... д-ра техн. наук / Корчунов Алексей Георгиевич. Магнитогорск, 2010. 320 с.
116. Голубчик Э.М. Адаптивное управление качеством металлопродукции // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 63–69.
117. Голубчик Э.М. Телегин В.Е., Рубин Г.Ш. Применение принципов технологической адаптации при управлении показателями качества в многовариантной технологической системе изготовления холоднокатаной ленты // Качество в обработке материалов. 2014. № 1. С. 34–41.
118. Применение адаптационных механизмов для повышения качества продукции с глубокой степенью переработки / Э.М. Голубчик, А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова, А.В. Лысенин // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. 2011. № 5. С. 131–134.
119. Голубчик Э.М. Адаптивные подходы к управлению качеством продукции в многовариантных технологических системах // Методы менеджмента качества. 2013. № 7. С. 36–41.
120. Рубин Г.Ш., Полякова М.А. Развитие научных основ стандартизации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 97–102.
121. Полякова М.А., Рубин Г.Ш. Современное направление стандартизации как науки // Черные металлы. 2014. № 6. С. 32–37.
122. Зюлин В.Д., Харитонов В.А. Устойчивость высокой полосы при прокатке в гладких валках. Сообщение 1 // Изв. вузов. Черная металлургия. 1981. № 6. С. 60–63.
123. Зюлин В.Д., Харитонов В.А. Устойчивость высокой полосы при прокатке в гладких валках. Сообщение 2 // Изв. вузов. Черная металлургия. 1982. № 2. С. 32–35.
124. Харитонов В.А. Развитие теории и технологии прокатки в четырехвалковых калибрах проволоки различного назначения // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск. 2002. С. 273–277.
125. Харитонов В.А., Корчунов А.Г., Зайцева М.В. Повышение эффективности технологического процесса изготовления низкоуглеродистой арматурной проволоки // Производство проката. 2005. № 8. С. 21–25.

INNOVATIVE METHODS AND DECISIONS IN MATERIALS PROCESSING

Gun Gennady Semenovich – D.Sc. (Eng.), Advisor of the Rector, Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Phone: +7 3519 235 766, 298 526. E-mail: goun@magtu.ru.

Abstract. The article gives a review of main scientific trends and theoretical results of one of leading departments in Russia – the Mechanical Engineering and Metallurgical Technologies Department of Nosov Magnitogorsk State Technical University.

Keywords: material forming, quality, metalware production, system approach, innovative methods.

References

1. Steblyanko V.L. Creation of technologies for bimetal wire and coatings production based on processes combined with plastic deformation. Doctoral dissertation (technical sciences). Magnitogorsk, 2000, 300 p.
2. Steblyanko V.L., Sitnikov I.V. Cleaning and activating metal surfaces before plating and coating processes. Chermetinformatsia: survey information. Moscow, 1991, 22 p.
3. Gostev A.A., Gun G.S., Chukin M.V., Mezin I.Yu. and others. Usage of pig iron chips as raw materials for powder production. *Novye tekhnologii polucheniya sloistykh materialov i kompozitsionnykh pokrytiy: materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [New technologies for obtaining laminated materials and composite coatings: Papers of the international scientific and technical conference]. Sochi, 5–8 October, 1992.
4. Gun G.S., Mezin I.Yu. Production of Durable Materials and Products on the basis of steel carbide chromium // *Advances in Materials & Processes international conference & exhibition*, 16-19 February 1992. Mumbai, India, 1992.
5. Gun I.G., Mikhailovskiy I.A., Osipov D.S. and others. NPO BelMag – 10 years of moving ahead. Magnitogorsk: Magnitogorsk Publishing House, 2007, 104 p.
6. Arkulis G.E. *Sovmestnaya plasticheskaya deformatsiya raznorodnykh metallov* [Joint plastic deformation of dissimilar metals]. Moscow: Metallurgiya, 1964, 272 p.
7. Arkulis G.E., Dorogobid V.G. *Teoriya plastichnosti* [The theory of plasticity]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 352 p.
8. Belalov Kh.N., Klekovkina N.A., Klekovkin A.A., Nikiforov B.A., Gun G.S., Korchunov A.G., Zyuzin V.I., Kulesha V.A., Savelyev E.V. *Proizvodstvo stalnoy provoloki* [Production of steel wire: monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2005, 543 p.
9. Belalov Kh.N., Klekovkina N.A., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. *Stalnaya provoloka* [Steel wire: monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011, 689 p.
10. Kulesha V.A., Klekovkina N.A., Belalov Kh.N. *Izgotovlenie vysokokachestvennykh metizov (nauchny i prakticheskiy opyt Beloretskogo metallurgicheskogo kombinata)* [Production of high quality metalware (scientific and practical experience of Beloretsk Iron and Steel Works)]. Magnitogorsk: Magnitogorsk Publishing House, 1999, 328 p.
11. 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.; under the general editorship of Chukin M.V. *Proizvodstvo vysokoprochnoy stalnoy armatury dlya zhelezobetonnnykh shpal novogo pokoleniya* [High-tensile steel reinforcement bars for reinforced concrete sleepers of a new generation]. Moscow: Metallurgizdat, 2014, 276 p.
12. Kharitonov V.A. Trends in wire manufacturing processes. *Metalware production in the 21st century: Interuniversity collection of scientific papers*. Magnitogorsk, 2001, pp. 4–15.
13. Mezin I.Yu. Development of a theory and technology of working metal products by cold pressing of structurally heterogeneous materials. Doctoral dissertation (technical sciences). Magnitogorsk, 2001, 360 p.
14. Mezin I.Yu. *Formirovanie metalloizdeliy iz strukturno-neodnorodnykh materialov* [Working metal products from structurally heterogeneous materials: monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2000, 155 p.
15. Gun G.S., Gun I.G., Mezin I. Yu. and others. Efficient downstream steel processing techniques at Magnitogorsk metallurgical plants. New materials and technologies-98: Materials of the all-Russian scientific and technological conference. Moscow: LATMES, 1998, p. 72.
16. Ryabkov V.M., Gun G.S., Mezin I.Yu. The principles of developing steel – carbide chrome composite powder materials by cold deformation of porous ingots. International Conference "Materials by Powder Technology – PTM 93", March 23–26, 1993, Dresden, Germany.
17. Gun G.S., Mezin I.Yu. Investigation of contact phenomenon during consolidation process in powder material. New technologies for obtaining laminated and powder materials, composite coatings: Papers of the international scientific and technical conference. Sochi, 1993, pp. 115–116.
18. Gun G.S., Mezin I.Yu., Gun I.G. and others. Theoretical and technological principles of manufacturing powders and items with a varied ferrous-base composition. Papers of the all-Russian interuniversity scientific and technological conference "Fundamental problems in metallurgy". Yekaterinburg: UGTU, 1995, p. 91.
19. Gun G.S., Gostev A.A., Mezin I.Yu., Kozodaev E.G., Timoshenko I.F., Gun I.G. *Poluchenie poroshkovykh materialov i izdeliy (Opyt raboty zavoda «Mars»)* [Manufacturing of powder materials and products (experience of the Mars plant): monograph]. Magnitogorsk, 1993, 112 p.
20. Polyakov M.G., Nikiforov B.A., Gun G.S. and others. Calibration of a VAZ car hinge profile. *Teoriya i praktika proizvodstva stalnykh fasonnykh profiley* [Theory and practice of steel shaped profile production]. Magnitogorsk: MGMI, 1971, vol. 106.
21. Gun G.S., Bogatyrev Yu.P., Kandaurov L.E. and others. Calibration of a T-shape profile for the Moskvich brake block. *Teoriya i praktika proizvodstva stalnykh fasonnykh profiley* [Theory and practice of steel shaped profile production]. Magnitogorsk: MGMI, 1974, Vol. 140.
22. Gun G.S., Rubin G.Sh., Bogatyrev Yu.P. and others. Field of velocities during T-shape profile rolling in three-roll passes. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 1979, no. 4.
23. Gun G.S., Gostev A.A., Gun I.G. A conception of a powder metallurgy mini-plant using pig iron chips as an input material. New technologies for obtaining laminated and powder materials, composite coatings: Papers of the international scientific and technical conference. Sochi, 7-10 September 1993. Sochi, 1993.
24. Gun G.S., Mezin I.Yu., Tolmacheva O.B., Gun I.G., Gostev A.A., Kozodaev E.G. and others. Selection of materials and development of a manufacturing technique for brake elements of a light vehicle disc-type brake using powder metallurgy methods. *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya nauchno-tekhnicheskogo potentsiala Yuzhno-Uralskogo regiona* [Status and prospects of the scientific and technical potential development of the South Ural region], papers of the interstate scientific and technological conference. Magnitogorsk: MGMI, 1994, p. 124.
25. Gun G.S., Mezin I.Yu., Tolmacheva O.B., Gun I.G., Gostev A.A., Kozodaev E.G. and others. Using pig iron chips from Magnitogorsk Iron and Steel Works for antifirthing materials production. *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov* [Solid and laminated materials processing: Interinstitute collection of scientific papers]. Ed. by Gun G.S. Magnitogorsk: MGMA, pp. 54–65.
26. Gun G.S., Gostev A.A., Kuts V.A., Khrebto V.E., Gun I.G. Mechanical engineering complex development at OJSC MMK. Papers of the 2nd congress of rolling mill engineers. Moscow, 1998, pp. 334–336.
27. Gun I.G., Mikhailovskiy I.A. Method of finishing partial spherical surfaces by rolling. *Mechanical engineering technology*, 2001, no.

- 4, pp. 334–336.
28. Mikhailovsky I.A., Salnikov V.V., Osipov D.S., Gun I.G. Improvement of a ball joint head planetary rolling modes based on the surface microtopography analysis to increase the quality of products. *Vestnik of the Cherepovets State University*, 2011, no. 1, vol. 2, pp. 39–44.
29. Salnikov V.V., Mikhailovsky I.A., Gun I.G. Simulating a damage process of a car front suspension ball-and-socket joint at axial loading. *AAU Journal*, 2011, no. 2, pp. 51–53.
30. Gun I.G., Mikhailovsky I.A. Analysis and improvement of a ball joint head planetary rolling process. Improvement of technological processes and car components design: collection of scientific papers. Moscow: AAI-PRESS, 2003, pp. 119–123.
31. Mikhailovsky I.A., Gun I.G., Lapchinsky V.V. Implementation method and analysis of a consolidated test of VAZ 2101-2107 front suspension upper ball joints. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2004, no. 4 (8), pp. 43–50.
32. Mikhailovsky I.A., Gun I.G., Yasakov Yu.M. and others. A test bench for ball-and-socket joints. Patent of the Russian Federation no. 2263889.
33. Gun I.G., Zhelezkov O.S., Mikhailovsky I.A. [A method of processing a partially spherical ball joint head by surface deformation]. Patent of the Russian Federation no. 2162785, 2001.
34. Gun I.G., Artyukhin V.I., Kalmykov Yu.V., Levchenko P.E., Salnikov V.V., Gun E.I. [A ball-and-socket joint]. Patent of the Russian Federation no. 2475652, IPC F16C 11/06. Published on 20.02.2013. Bul. no. 5.
35. Gun I.G., Artyukhin V.I., Gun E.I., Kalmykov Yu.V., Salnikov V.V., Kutsependik V.I. A steering ball-and-socket joint. Patent of the Russian Federation no. 2501995, IPC F16C 11/06, B62D 7/16. Published on 20.12.2013. Bul. no. 35.
36. Mikhailovsky I.A., Gun I.G., Gun E.I., Kasatkina E.G. *Sharovye sharniry shassi: sovershenstvovanie konstruktsii, tekhnologii i metodov otsenki kachestva* [Chassis ball-and-socket joints: improvement of structures, manufacturing technologies and quality control methods: monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, 201 p.
37. Gun I.G., Mikhailovskiy I.A., Osipov D.S., Kutsependik V.I., Salnikov V.V., Gun E.I., Smirnov A.V., Smirnov A.V. The development, modeling and improvement of automotive ball joint manufacturing processes. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2014, no. 1 (45), pp. 52–57.
38. Mikhailovsky I.A., Kutsependik V.I., Gun E.I., Gun I.G., Salnikov V.V. Development of planetary-rotating rolling. *Metallurgical processes and equipment*, 2014, no. 1, pp. 39–45.
39. Gun I.G., Osipov D.S., Mikhailovsky I.A., Kalmykov Yu.V., Kutsependik V.I., Salnikov V.V., Gun E.I. Development, simulation and investigation of metal forming processes during car ball-and-socket joint manufacturing. *Innovatsionnye tekhnologii obrabotki metallov davleniem* [Metal forming innovative technologies: Papers of the international scientific and technological conference]. Moscow: NUST MISiS, 2011, pp. 482–487.
40. Kutsependik V.I., Gun I.G., Mikhailovsky I.A., Osipov D.S., Salnikov V.V., Gun E.I., Smirnov A.V., Smirnov A.V. Development of metal forming processes to produce car components. XIV International Scientific Conference "New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering": a collective monograph edited by Henryk Dyja, Anna Kawalek. Series: monographs No 31. Czestochowa, 2013, pp. 309–316.
41. Chukin M.V. Theory development and optimization of technological and operational deformation processes for coated products. Doctoral dissertation (technical sciences). Magnitogorsk, 2001, 398 p.
42. Gun G.S., Krivoschapov V.V., Chukin M.V., Adamchuk V.S., Tsun A.M. *Uprochnyayushchie i vosstanavlivayushchie pokrytiya* [Strengthening and recovering coatings]. Chelyabinsk: Metallurgiya, 1991, 160 p.
43. Kuznetsov E.I., Chukin M.V., Baryshnikov M.P., Semenova O.V. *Sloistye kompozitsionnye pokrytiya v metiznoy promyshlennosti* [Laminated composite coatings in the metalware industry]. Vol. 1. Magnitogorsk: PMP MiniTip, 1997, 96 p.
44. Kuznetsov E.I., Chukin M.V., Baryshnikov M.P., Semenova O.V. *Sloistye kompozitsionnye pokrytiya v metiznoy promyshlennosti* [Laminated composite coatings in the metalware industry]. Vol. 2. Magnitogorsk: PMP MiniTip, 1997, 208 p.
45. Gostev A.A., Chukin M.V., Gun G.S. and others. Hardening of mill rolls by pig iron powder sintering. Development tendencies of OJSC MMK's mechanical engineering complex: collection of scientific papers. Ed. by Gostev A.A. Magnitogorsk, 1996, pp. 168–171.
46. Gun G.S., Chukin M.V., Baryshnikov M.P. Kinematics of drawing of bilayered composite materials with a polymer matrix. Papers of the 5th International Conference "Films and coatings". Saint Petersburg, 1998, pp. 5–8.
47. Chukin M.V. Development of a theory of functional coating wire drawing. Papers of the First International Scientific and Technical Conference "Physics of metals and non-conventional material deformation". Samara, 1999, pp. 36–37.
48. Gun G.S., Chukin M.V. *Optimizatsiya protsessov tekhnologicheskogo i ekspluatatsionnogo deformirovaniya izdeliy s pokrytiami* [Optimization of technological and operational deformation processes for coated products]. Magnitogorsk: MGUTU, 2006, 323 p.
49. Gun G.S. Improvement of the high-precision profile manufacturing technology by optimization of a complex quality criterion. Doctoral dissertation (technical sciences). Moscow, 1985, 276 p.
50. Gun G.S. *Upravlenie kachestvom vysokotochnykh profiley* [High-precision profile quality management: monograph]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 152 p.
51. Gun G.S., Storozhev S.B. Calculation of a complex quality criterion by the example of a quality evaluation of high-precision steel shaped profiles. *Standards and quality*, 1978, no. 1.
52. Gun G.S. A method of a complex metal products quality evaluation. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 1982, no. 8.
53. Gun G.S., Rubin G.Sh., Pudov E.A. and others. Complex steel rope wire quality evaluation. *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 1983, no. 12.
54. Gun G.S. A theoretical justification of a complex metal products quality evaluation. *News of the USSR Academy of Sciences. Metals*, 1983, no. 4.
55. Gun G.S. Criteria of shaped profile manufacturing process quality management. *News of the USSR Academy of Sciences. Metals*, 1984, no. 2.
56. Mikhailovsky I.A. Increasing performance of a ball-and-socket joint manufacturing process by regulating a set of requirements for the quality of products and materials. Doctoral dissertation (technical sciences). Magnitogorsk, 2011, 310 p.
57. Ushakov S.N., Chukin M.V., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. High-strength reinforced bars for reinforced concrete sleepers of a new generation. *Railways and railway equipment*, 2012, no. 11, pp. 25–28.
58. Chukin M.V., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. Prospects for high-strength steel reinforcement bars for ferro-concrete sleepers of a new generation based on thermal and deformational nanostructuring. *Ferrous metallurgy. Bulletin of Chernometinformatsia*, 2012, vol. 4, pp. 100–105.
59. Chukin M.V., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. Prospects for high-strength steel reinforcement bars for ferro-concrete sleepers of a new generation based on thermal and deformational nanostructuring. Week of metals in Moscow: collection of conference papers. 15–18 November 2011. Moscow: VNIIMETMASH, 2012, pp. 79–87.
60. Chukin M., Gun G., Emaleeva D. Manufacturing of high-strength nanostructured reinforcement for ferro-concrete sleepers. XIII International Scientific conference "New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering: a collective monograph edited by Henryk Dyja, Anna Kawalek. Series: monographs No 24. Czestochowa, 2012, pp. 327–332.
61. Chukin M.V., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. Prospects for production of high-strength steel reinforced bars made of high-carbon steels. *Chernye metally*, December of 2012, pp. 8–15.
62. Kolokoltsev V.M., Chukin M.V., Gun G.S., Golubchik E.M., Kuz-

- netsova A.S. Organization of low-capacity manufacturing of nanostructured workpieces from multifunctional alloys with special properties. Papers of the 9th congress of rolling mill engineers. Vol. 1. Cherepovets, 16–18 April 2013, pp. 248–251.
63. Chukin M.V., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A., Koptseva N.V., Dolgiy D.K., Lysenin A.V. Impact of technological modes on mechanical properties and a microstructure of high-strength reinforcement with a diameter of 9.6 mm. IX International Scientific conference "New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering: a collective monograph edited by Henryk Dyja, Anna Kawalek. Series: monographs No 31. Czestochowa, 2013, pp. 367–373.
64. Chukin M.V., Gun G.S., Golubchik E.M., Kuznetsova A.S., Bukhvalov N.Yu., Pustovoi K.S. Implementation of a project for low-capacity manufacturing of nanostructured workpieces from multifunctional alloys with special properties. XIV International Scientific conference "New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering: a collective monograph edited by Henryk Dyja, Anna Kawalek. Series: monographs No 31. Czestochowa, 2013, pp. 374–378.
65. Chukin M.V., Korchunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V. Nanodimensional in high carbon steel structural part formation by thermal and deformation processing. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 5 (45), pp. 33–35.
66. Chukin M.V., Polyakova M.A., Rubin G.Sh., Koptseva N.V., Gun G.S. Outlook for production of high-strength fasteners from carbon steel billets with an ultra-fine grain structure. *Press forging. Materials forming*, 2014, no. 1, pp. 39–44.
67. Chukin M.V., Golubchik E.M., Gun G.S., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Chukin D.M., Matushkin A.N. The study of physical and mechanical properties and the structure of high-strength multifunctional invar alloys of a new generation. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1 (45), pp. 43–48.
68. Chukin M.V., Valiev R.Z., Raab G.I., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu. The study of evolution of the 20 and 45 nanosteel structure at critical plastic deformation degrees. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2007, no. 4 (20), pp. 89–93.
69. Gun G.S., Chukin M.V., Emaleeva D.G., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Baryshnikov M.P. The study of formation of the submicrocrystalline structure of a steel wire surface layer to improve its mechanical properties. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2007, no. 3 (19), pp. 84–96.
70. Gun G.S., Chukin M.V., Emaleeva D.G., Koptseva N.V., Chukin V.V., Baryshnikov M.P. Formation of the submicrocrystalline structure of a steel wire surface layer by equal channel angular drawing. Papers of the 7th Congress of rolling mill engineers. Vol. 1. Moscow, 2007, pp. 364–368.
71. Chukin M.V., Koptseva N.V., Valiev R.Z., Yakovleva I.L., G. Zrnik, T. Covarik. Diffraction electron-microscopic analysis of the carbon structural steel submicrostructure and nanostructure construction after equal channel angular pressing and subsequent deformation. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2008, no. 1 (21), pp. 31–37.
72. Efimova Yu.Yu., Koptseva N.V., Chukin V.V., Emaleeva D.G., Zubkova T.A., Nikitenko O.A. Steel-copper bimetallic wire nanostructuring. Papers of the 66th scientific and technical conference. Magnitogorsk: MGTU, 2008, vol. 1, pp. 49–52.
73. Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Chukin M.V., Polyakova M.A. Influence of preliminary heat treatment on structure and properties of 20 and 45 carbon structural steels nano-structurized via the method of uni-channelled angular extrusion. *Ferrous metals* [Chemye metally] (Translated from German). July of 2010, pp. 14–19.
74. Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Baryshnikov M.P., Nikitenko O.A. Formation of a carbon structural steel structure and mechanical properties during nanostructuring by equal channel angular extrusion. *Materials deformation and destruction*, 2011, no. 7, pp. 11–17.
75. Chukin M.V., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Nikitenko O.A., Polyakova M.A. Criterion estimation of severe plastic deformation efficiency from the position of their influence on the carbon steel structures evolution. *CIS Iron and Steel Review*, 2010, pp. 28–31.
76. Chukin M.V., Koptseva N.V., Nikitenko O.A., Efimova Yu.Yu. Mechanical properties of carbon structural ultrafine grained steel. *Ferrous metals. Special issue*, 2011, pp. 54–59.
77. Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Baryshnikov M.P., Mikhlenko D.A. Impact of temperature and a heating period on the thermal stability of carbon structural steels with an ultrafine grained structure achieved by equal channel angular extrusion. *Materials deformation and destruction*, 2011, no. 8, pp. 14–20.
78. Koptseva N.V., Mikhlenko D.A., Efimova Yu.Yu. Evolution of the microstructure and properties during heating the ferrite-pearlite carbon structural steels with an ultrafine grained structure achieved by intensive plastic deformation. *Vestnik of Voronezh State Technical University*, 2011, vol. 7, no. 9, pp. 85–91.
79. Efimova Yu.Yu., Koptseva N.V., Chukin V.V., Polyakova M.A., Baryshnikov M.P. The study of the nanostructured carbon steel bolt structure and properties. *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov* [Solid and laminated materials processing: interuniversity collection of scientific articles ed. by Chukin M.V.]. Magnitogorsk: MGTU, 2008, no. 38, pp. 144–150.
80. Chukin M.V., Koptseva N.V., Baryshnikov M.P., Efimova Yu.Yu., Nosov A.D., Noskov E.P., Kolomiets B.A. The innovative potential of new nanostructured steel metalware production techniques. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2009, no. 2 (26), pp. 64–68.
81. Koptseva N.V., Polyakova M.A., Efimova Yu.Yu., Kuznetsova A.S., Mokhnatkin A.V. The microstructure and physical and mechanical properties of bulk ultrafine grained materials: Certificate on state registration of data bases No. 2010620405 (29.07.2010), application No.201062026 (07.06.2010); published on 20.12.2010. *Bul. OBPBT* no. 4 (75), pp. 551.
82. Chukin M.V., Baryshnikov M.P., Belyaev A.O. Method for evaluation of the proportionality factor in metal forming processes based on object oriented programming. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2008, no. 4 (24), pp. 76–79.
83. Chukin M.V., Baryshnikov M.P., Belyaev A.O. Approach to the estimation of the friction coefficient in metal forming considering a contact zone as noncompact background. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 2010, no. 3, pp. 25–28.
84. Baryshnikov M.P., Chukin M.V., Boyko A.B. Analysis of software packages for composite materials stress-strain evaluation during forming. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012, no. 4 (40), pp. 72–74.
85. Baryshnikov M.P., Chukin M.V., Gun G.S., Boyko A.B. Wire drawing process simulation accounting structure heterogeneity in SIMULIA ABAQUS. *Metal plastic deformation*. Dnepropetrovsk, 2014, pp. 156–158.
86. Courant R., Friedrichs K., Lewy H. Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik. *Mathematische Annalen*. 1928, vol. 100, no. 1, pp. 32–74.
87. Toffoli T., Margolis N. Cellular automata machines. Transl. from English. Moscow: Mir, 1991, 280 p.
88. Rubin G.Sh., Shishov A.A. Cellular automaton models of deformed media. Papers of the 8th Congress of rolling mill engineers. Magnitogorsk, 2010, pp. 451–453.
89. Rubin G.Sh., Vakhitova F.T., Lebedev V.N., Guseva E.N., Shishov A.A. A methodological approach to metalware manufacturing quality management based on fuzzy sets. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*

- [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2009, no. 4 (28), pp. 50–53.
90. Korchunov A.G., Chukin M.V., Gun G.S., Polyakova M.A. *Upravlenie kachestvom produktii v tekhnologiyakh metiznogo proizvodstva* [Quality management in metalware production technologies: monograph]. Moscow: Ore and metals, 2012, 164 p.
91. Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun G.S., Zakirov D.M., Gun I.G. Development of a qualimetry theory for metalware. *Chernye metally*, July 2012, pp. 15–21.
92. Rubin G.Sh., Polyakova M.A., Chukin M.V., Gun G.S. Protipology is the next stage of metalware standartization development. *Steel*, 2013, no. 10, pp. 84–87.
93. Gun G.S., Chukin M.V., Gun I.G., Korchunov A.G., Mezin I.Yu., Rubin G.Sh., Zakirov D.M. Development of a metalware manufacturing qualimetry theory. Papers of the 9th congress of rolling mill engineers. Vol. 1. Cherepovets, 16-18 April 2013. pp. 237–244.
94. Rubin G.Sh., Gun G.S., Chukin M.V., Korchunov A.G. Qualimetry in metallurgy. Quality in industrial and social and economic systems: Papers of the international scientific and technical conference. Kursk, 2013, pp. 185–189.
95. Rubin G.Sh., Gun G.S., Chukin M.V., Gun I.G., Korchunov A.G. Creation of qualimetry theory in metallurgy. XIV International Scientific conference "New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering: a collective monograph edited by Henryk Dyja, Anna Kawalek. Series: monographs No 31. Czestochowa, 2013, pp. 51–55.
96. 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.
97. Gun G.S., Chukin M.V., Rubin G.Sh. Quality management in metalware production. *Metallurgical processes and equipment*. LLC Tekhnopark Don GTU UNITEKS (Donetsk, Ukraine). 2013, no. 4 (34), pp. 106–112.
98. Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V., Mezin I.Yu., Korchunov A.G., Gun I.G. Creation and development of a qualimetry theory in metallurgy. Papers of the 10th international scientific and technical conference "Modern metal materials and technologies". 25–29 June 2013. Saint Petersburg, 2013.
99. Gun G.S., Mezin I.Yu., Korchunov A.G., Chukin M.V., Gun I.G., Rubin G.Sh. Educational research school of Nosov Magnitogorsk State Technical University in product and industrial process quality management. *Quality in materials processing*, 2014, no. 1, pp. 5–8.
100. G.S. Gun, I.Yu. Mezin, G.Sh. Rubin, A.A. Minaev, A.E. Nazaybekov, H. Dyja. The research genesis in the field of the steel products quality. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1 (45), pp. 92–97.
101. Gitman M.B., Pustovoi K.S., Stolbov V.Yu., Fedoseev S.A., Gun G.S. A conceptual model of a situational center of an industrial enterprise. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2014, no. 1 (45), pp. 102–107.
102. Gun G.S., Chukin M.V., Rubin G.Sh., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. Modern problems of metalware production qualimetry during the sixth technology revolution. *Metallurg*, 2014, no. 4, pp. 92–95.
103. Rubin G.Sh. *Kvalimetriya metiznogo proizvodstva* [Metalware production qualimetry: monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, 167 p.
104. Rubin G.Sh., Gerasimova Z.A., Vaisman D.I. Raschet i analiz ispolzovaniya proizvodstvennykh moshchnostey metiznoy promyshlennosti [Evaluation and analysis of utilization of metalware facilities: monograph]. Moscow: Metallurgia, 1985, 48 p.
105. Gun I.G., Rubin G.Sh., Salnokov V.V. and others. *Kompleksnaya otsenka effektivnosti protsessov proizvodstva sharovykh pal'tsev* [A complex evaluation of the efficiency of a ball-and-socket joint manufacturing process: monograph]. Magnitogorsk: MGTU, 2008, 133 p.
106. Gun G.S., Krylov A.I., Rubin G.Sh. and others. On plastic forming estimation. News of the USSR Academy of Science. Metals, 1976, no. 6, pp. 109–112.
107. Rubin G.Sh., Gun G.S., Bogatyrev Yu.P. and others. Comparison of different metal forming processes in terms of forming performance. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 1980, no. 5, pp. 52–54.
108. Rubin G.Sh., Gun G.S., Pudov E.A. and others. Selection of the efficient technology for profiles of extended precision for machine building. *Izvestiya vuzov. Mashinostroyeniye*, 1981, no. 5, pp. 155–157.
109. Andreev V.V., Gun G.S., Rubin G.Sh., Ulyanov A.G. Study of a double-flange antiskid tongue discharging process using computer simulation. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2008, no. 1 (21), pp. 45–49.
110. Korchunov A.G. Metalware quality management based on fuzzy logic models for a description of technological inheritance. *Metallurg*, 2009, no. 5, pp. 50–53.
111. Korchunov A., Chukin M., Lysenin A. Methodology of developing mathematical models with fuzzy logic elements for quality indices control. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 436, pp. 374–381.
112. Korchunov A.G., Lysenin A.V. Metalware quality management in conditions of fuzzy technological information. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2012, no. 3 (39), pp. 43–45.
113. Korchunov A.G. Issues related to products' quality assurance in metalware technologies. *Metallurg*, 2008, no. 10, pp. 67–72.
114. Korchunov A.G. Improvement of a quality management technique in metalware production processes. *Rolling production*, 2008, no. 12, pp. 8–13.
115. Korchunov A.G. Methodology of products quality management in metalware technologies based on models with fuzzy logic elements. Doctoral dissertation (technical sciences). Magnitogorsk, 2010, 320 p.
116. Golubchik E.M. Adaptive control of metal products quality. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1 (45), pp. 63–69.
117. Golubchik E.M., Telegin V.E., Rubin G.Sh. Application of technological adaptation principles for the quality index control in a multi-variant technological system of cold rolled narrow strips. *Quality in materials processing*, 2014, no. 1, pp. 34–41.
118. Golubchik E.M., Korchunov A.G., Pivovarova K.G., Lysenin A.V. Adaptation mechanisms used to improve the quality of downstream products. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 5, pp. 131–134.
119. Golubchik E.M. Adaptive approaches to products quality management in multivariant technological systems. *Quality management methods*, 2013, no. 7, pp. 36–41.
120. Rubin G.Sh., Polyakova M.A. Development of standartization scientific fundamentals. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1 (45), pp. 97–102.
121. Polyakova M.A., Rubin G.Sh. Modern tendency of standardization as science. *Ferrous metals*, 2014, no. 6, pp. 32–37.
122. Zyulin V.D., Kharitonov V.A. Stability of high sheets during rolling in plain rolls. Report 1. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 1981, no. 6, pp. 60–63.
123. Zyulin V.D., Kharitonov V.A. Stability of high sheets during rolling in plain rolls. Report 2. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 1982, no. 2, pp. 32–35.
124. Kharitonov V.A. Development of a theory and technology of wire rolling in four-roll passes for different applications. *Modelirovaniye i razvitiye protsessov obrabotki metallov davleniem* [Simulation and improvement of metal forming processes: interregional collection of scientific papers]. Magnitogorsk, 2002, pp. 273–277.
125. Kharitonov V.A., Korchunov A.G., Zaitseva M.V. Increasing the efficiency of a low carbon reinforcement wire technological process. *Rolling production*, 2005, no. 8, pp. 21–25.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Аллабердин Азамат Булякович – аспирант кафедры ПРМПИ, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел. 8(3519)29-84-61, 29-84-66. E-mail: Allaberdinazamat@mail.ru.

Барков Леонид Андреевич – д-р техн. наук, профессор, зам. по науч. работе руководителя НОЦ «Ресурсный центр спецметаллургии» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: barkovla@susu.ac.ru.

Барышников Михаил Павлович – канд. техн. наук, проф. каф. машиностроительных и металлургических технологий ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. E-mail: arcsomag@mail.ru.

Белевская Ирина Валерьевна – аспирант кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел.: 8 (3519)23-06-82. E-mail: belirena@yandex.ru.

Белевский Леонид Сергеевич – д-р техн. наук, проф. кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел.: 8 (3519)09-76-79. E-mail: l.belevskiy@mail.ru.

Бережная Галина Андреевна – канд. техн. наук, доц. кафедры обработки металлов давлением, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел.: 8(3519)29-85-25. E-mail: galina_1609@mail.ru.

Бойко Артём Борисович – аспирант ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. E-mail: boyko.ab@mail.ru.

Бреда Марко – аспирант кафедры промышленного производства (DIP) Падуанского университета, Италия. E-mail: marco.breda@studenti.unipd.it.

Валеев Азат Салимьянович – д-р пед. наук, канд. техн. наук., профессор кафедры ОТД, Сибайский институт (филиал) ФГБУ ВПО «Башкирский государственный университет», Башкортостан. E-mail: Valeev_as@mail.ru.

Ванг Кайкун – д-р инж. наук, проф., Школа науки о материалах и инженерии, Пекинский университет науки и технологии. Директор национальной и региональной объединенной лаборатории обработки цветных металлов и сплавов Ланжойского технологического университета, Китай. Email: kkwang@mater.ustb.edu.cn.

Вохмин Сергей Антонович – канд. техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Шахтное и подземное строительство», Институт горного дела, геологии и геотехнологий, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия.

Гитман Михаил Борисович – д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры «Математическое моделирование систем и процессов» ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия. Тел.: 8 (342)239-12-97. E-mail: trv@matmod.pstu.ac.ru.

Гун Геннадий Семенович – д-р техн. наук, советник ректора, проф. кафедры «Машиностроительных и металлургических технологий» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.: 8(3519)23-57-66, 29-85-26. E-mail: goun@magtu.ru.

Гущина Марина Сергеевна – аспирант кафедры обработки металлов давлением, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский

государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел.: 8(3519) 29-85-25. E-mail: marina.mgn.89@mail.ru.

Девятченко Леонид Дмитриевич – канд. техн. наук, доц. кафедры математики ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел.: 8 (3519)29-85-24, E-mail: mgtn@mgtn.ru.

Денисов Сергей Владимирович – д-р техн. наук, начальник центральной лаборатории контроля ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Россия. E-mail: Denisov.sv@mmk.ru.

Дерягин Павел Александрович – гл. инженер проекта Норильского филиала ООО «Институт Гипроникель», «Институт Норильскпроект».

Джигун Николай Сергеевич – аспирант НОЦ «Ресурсный центр спецметаллургии» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: tusove@gmail.com.

Дзя Хенрик – д-р техн. наук, проф., директор Института формоизменения и инженерной безопасности, Ченстоховский технологический университет, Польша. E-mail: dya@wip.pcz.pl.

Дюжечкин Михаил Константинович – инженер ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова». г. Новочеркасск, Россия. E-mail: m.tsenturion@yandex.ru.

Ефимова Юлия Юрьевна – канд. техн. наук, доц. кафедры металлургических и машиностроительных технологий ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел.: 8 (3519)29-84-81. E-mail: jefimova78@mail.ru.

Калляри Ирене – науч. сотрудник кафедры промышленного производства (DIP) Падуанского университета, Италия. E-mail: irene.calliari@unipd.it.

Кирсанов Александр Константинович – студент Института горного дела, геологии и геотехнологий, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. E-mail: aka_sancho@mail.ru.

Колокольников Валерий Михайлович – д-р техн. наук, проф., ректор ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел.: 8(3519)29-84-02. E-mail: kwm@magtu.ru.

Копцева Наталья Васильевна – д-р техн. наук, проф. кафедры литейного производства и материаловедения ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел.: 8 (3519)29-85-67. E-mail: kopceva1948@mail.ru.

Корчунов Алексей Георгиевич – д-р техн. наук, проректор по международной деятельности, зав. кафедрой проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. E-mail: agkorchunov@mail.ru.

Кузнецова Алла Сергеевна – научный сотрудник кафедры машиностроительных и металлургических технологий, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел.: 8(3519)32-85-12. E-mail: allakuznetsova.mgtu@mail.ru.

Курчин Георгий Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Шахтное и подземное строительство», Институт горного дела, геологии и геотехнологий, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. E-mail: KurchinGS@mail.ru.

Латфулина Юлия Сергеевна – инженер НОЦ «Ресурсный центр спецметаллургии» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: latfulina174@gmail.com.

Лехов Олег Степанович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой механики Российского государственного профессионально-педагогического университета, г. Екатеринбург, Россия. Тел.: (343)341-79-40.

Лисин Илья Вячеславович – инженер, Российский государственный профессионально-педагогический университет, г. Екатеринбург, Россия. Тел.: (343)371-88-00.

Мещеряков Эдуард Юрьевич – канд. техн. наук, доц. кафедры ПРМПИ, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. E-mail: ntc@magtu.ru.

Ми Женли – д-р техн. наук, проф., зам. директора национального инженерного исследовательского центра по развитию технологии прокатки, зам. директора Института металлургии, зам. руководителя исследовательского Института, Пекинский университет науки и технологии, Китай, Email: mizl@nercar.ustb.edu.cn.

Назайбеков Абдрахман Батырбекович – академик, д-р техн. наук, проф., ректор Рудненского индустриального института, Казахстан. E-mail: gestor@ti.kz.

Нефедова Евгения Викторовна – канд. пед. наук, доц. кафедры математики и естествознания, Новотроицкий филиал НИТУ МИСиС, Россия. E-mail: russkisever@rambler.ru.

Няшин Юрий Иванович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Теоретическая механика и биомеханика» ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия. Тел.: 8 (342)239-17-02. E-mail: nyashin@inbox.ru.

Осипенко Михаил Анатольевич – канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры «Теоретическая механика и биомеханика» ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия. Тел.: 8 (342) 239-17-02. E-mail: oma@theormech.pstu.ac.ru.

Пеллиццари Массимо – доц. кафедры промышленного производства (ДИ) университета Тренто, Италия.

Першин Геннадий Дальтонович – д-р техн. наук, проф. кафедры горных машин и транспортно-технологических комплексов ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», Россия.

Песин Александр Моисеевич – д-р техн. наук, проф. кафедры обработки металлов давлением ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. E-mail: pesin@bk.ru.

Песин Александр Моисеевич – д-р техн. наук, проф. кафедры обработки металлов давлением ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел.: 8(3519)29-85-25. E-mail: pesin@bk.ru.

Петроченко Елена Васильевна – д-р техн. наук, проф. кафедры литейного производства и материаловедения ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. E-mail: evr3738@mail.ru.

Полецков Павел Петрович – д-р техн. наук, проф. кафедры обработки металлов давлением, ФГБОУ ВПО

«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел.: 8(3519)29-85-25. E-mail: pavel_poletskov@mail.ru.

Пустовойтов Денис Олегович – канд. техн. наук, доц. кафедры обработки металлов давлением ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. E-mail: pustovoirov_den@mail.ru.

Рамоус Эмилио – проф. кафедры промышленного производства (ДИ) Падуанского университета, Италия.

Салганик Виктор Матвеевич – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой обработки металлов давлением, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел.: 8(3519)29-85-06.

Самодурова Марина Николаевна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Машины и технология обработки металлов давлением», руководитель НОЦ «Ресурсный центр спецметаллургии» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский политехнический университет» (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: sm@susu.ac.ru.

Сергеенко Сергей Николаевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, зам. декана МФ по научной работе, профессор кафедры «Материаловедение и технология материалов» ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова», г. Новочеркасск, Россия.

Соколова Эльвира Илдаровна – аспирант кафедры ПЭиБЖД ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», эксперт по оценке условий труда в ООО «ЦЭАС-М», Россия. E-mail: Yudina_Elvira@mail.ru.

Танг Ди – д-р техн. наук, проф., директор национального инженерного исследовательского центра по развитию технологии прокатки, Пекинский университет науки и технологии, Китай. Email: tangdi@nercar.ustb.edu.cn.

Туев Михаил Юрьевич – доц. кафедры механики Российского государственного профессионально-педагогического университета, г. Екатеринбург, Россия. Тел.: (343)370-24-93.

Турлаев Валерий Васильевич – главный инженер ООО «Уральский дизель-моторный завод», г. Екатеринбург, Россия.

Уляков Максим Сергеевич – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры управления недвижимостью и инженерных систем ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», Россия. E-mail: maxim-atlet@yandex.ru.

Фриго Марко – менеджер по работе с клиентами Ootokumpr S.p.A., Генуя, Италия.

Черчинцев Вячеслав Дмитриевич – д-р техн. наук, проф., Заслуженный работник высшей школы РФ, зав. кафедрой экологии и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», Россия. E-mail: eco_safe@magtu.ru.

Чуккин Михаил Витальевич – д-р техн. наук, профессор, первый проректор-проректор по научной и инновационной работе ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. E-mail: m.chukkin@mail.ru.

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей. Журнал формируется по разделам, отражающим основные направления научной деятельности ученых МГТУ, в частности:

- РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.
- МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.
- ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.
- ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО
- ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.
- МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ.
- СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ.
- МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.
- НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.
- ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ.
- УПРАВЛЕНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ.
- СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ.
- ЭКОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ.
- ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ.
- СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ, ПОДГОТОВКА И ОБУЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ.
- ИНФОРМАЦИЯ И др.

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРИНИМАЕМЫМ К ПУБЛИКАЦИИ

1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СТАТЬИ (на русском и английском языках)

1.1. Наименование статьи (не более 15 слов). Должно кратко отражать содержание статьи. Не рекомендуется использовать сокращения и аббревиатуры.

1.2. Аффiliation. Указывается фамилия, имя, отчество авторов (транслитерация), ученая степень, звание, должность, полное название организации (ее официально принятый английский вариант), адрес электронной почты хотя бы одного из авторов.

1.3. Аннотация (100-250 слов). Включает гипотезу, цель, эксперименты и методы, основные результаты, применение результатов исследования в промышленности (излагается в прошедшем времени).

Онлайн-перевод запрещается!

1.4. Ключевые слова: от 5 до 15 основных терминов.

2. СТРУКТУРА ОСНОВНОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ

2.1. Введение (постановка проблемы)

2.2. Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

2.3. Результаты исследования и их обсуждение

2.4. Заключение (выводы)

2.5. Список литературы (на русском и английском языках)

3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

3.1. Рекомендуемый объем статьи – 6-8 стр.

3.2. Текст статьи, сведения об авторах, аннотация ключевые слова и список литературы представляются на электронном носителе в виде файла, созданного средствами **Microsoft Word**, и распечаткой на стандартных листах бумаги формата А4.

При наборе статьи в **Microsoft Word** рекомендуются следующие установки:

- **шрифт** – **Times New Roman**, размер – 14 пт, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- при вставке **формул** использовать встроенный редактор формул **Microsoft Equation** со стандартными установками, применяется только сквозная нумерация;
- **рисунки и фотографии**, вставленные в документ, должны быть четко выполнены, допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров (толщины линий и размеры обозначений должны обеспечивать четкость при уменьшении рисунка до рациональных размеров), в форматах *.TIF, *.JPG, с разрешением **не менее 300 dpi**, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов. Максимальный размер рисунка с подписью – 150×235 мм. В тексте статьи должны быть подрисуночные подписи в местах размещения рисунков. Например:

Рис. 4. Расчётная зависимость $\gamma(t) = I_{nt}/I_{no}$ от времени и удалённости КЗ от выводов асинхронного двигателя

- **таблицы** нумеруются, если их число более одной. Заголовков необходимо, когда таблица имеет самостоятельное значение, без заголовка дают таблицы вспомогательного характера.

3.3. При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц **СИ**.

4. ДОКУМЕНТЫ, ПРИЛАГАЕМЫЕ К СТАТЬЕ

4.1. Рецензия.

4.2. Экспертное заключение о возможности опубликования.

4.3. Договор.

Внимание! Публикация статей является бесплатной. Преимущество опубликования предоставляется авторам и учреждениям, оформившим подписку на журнал.

Статьи проходят обязательное научное рецензирование.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38. Магнитогорский государственный технический университет, Редколлегия журнала «Вестник МГТУ» М.В. Чукину.

Телефоны: (3519) 29-85-26, 22-14-93.

E-mail: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@mgtu.ru (с указанием темы сообщения «Вестник МГТУ»).