

# ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного  
технического университета им. Г. И. Носова

№4 (52) декабрь 2015 г.

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

Издается с марта 2003 года

## Редакционный совет

### Председатель редсовета:

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

### Члены редсовета:

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

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

**Дуб А.В.** – советник ген. директора ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»,

д-р техн. наук, Москва, Россия;

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

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

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

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

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

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

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

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

### Главный редактор:

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

### Первый зам. главного редактора:

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

### Зам. главного редактора:

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

### Ответственные секретари:

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

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

**Редактор:** Кутекина Н.В.

**Технический редактор:** Гаврусева К.В.

**Перевод на английский:** Баталова Ю.С.

© ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2015

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

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

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

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

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

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

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

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

### Адрес редакции:

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38  
Тел.: (3519) 22-14-93. Факс (3519) 23-57-60  
URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>  
E-mail: [rio\\_mgtu@mail.ru](mailto:rio_mgtu@mail.ru); [vestnik@mgtu.ru](mailto: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 25.12.2015. Заказ 800. Тираж 500 экз. Цена свободная.

# VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

No. 4 (52) December 2015

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

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

## Editorial Board Members

### Chairman:

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

### Honorary Board Members:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### Editor-in-Chief:

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

### First Deputy Editor-in-Chief:

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

### Deputy Editor-in-Chief:

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

### Executive Editors:

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

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

**Editor:** *Kutekina N.V.*

**Technical Editor:** *Gavruseva K.V.*

**Translated into English:** *Batalova Yu.S.*

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

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

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

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

### Editorial office:

38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia  
Tel.: +7 (3519) 221 493. Fax: +7 (3519) 235 760  
URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>  
E-mail: [rio\\_mgtu@mail.ru](mailto:rio_mgtu@mail.ru); [vestnik@mgtu.ru](mailto: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: 25.12.2015. Order 800. Circulation: 500. Open price.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Материалы докладов участников конференции .....</b>	<b>5</b>
<i>Ерпалов М.В., Богатов А.А.</i> Анализ причин возникновения дефектов при высадке концов труб нефтяного сортамента.....	7
<i>Чигинцев П.А., Семашко М.Ю., Шеркунов В.Г.</i> Исследование влияния технологических параметров на совмещенный процесс высадки, прошивки и обратного выдавливания.....	12
<i>Богатов А.А., Нухов Д.Ш.</i> Разработка способа кузнечной протяжки без изменения формы и размеров исходной заготовки.....	16
<i>Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Архипов Г.В., Константинов И.Л., Довженко И.Н., Лопатина Е.С., Ворошилов Д.С., Феськов Е.В.</i> Инновационные технологии получения катодных стержней для электролизеров.....	21
<i>Фокин Н.В., Космацкий Я.И., Денисюк С.А.</i> Исследование деформационной способности нового высоколегированного сплава и разработка технологии горячего прессования труб из него.....	27
<i>Богатов Н.А., Богатов А.А., Салихьянов Д.Р.</i> Развитие технологии изготовления труб в коррозионностойком исполнении.....	33
<i>Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Дитковская Ю.Д., Лопатина Е.С., Лебедева О.С., Рудницкий Э.А.</i> Создание новых сплавов ювелирного назначения из многокомпонентных систем драгоценных металлов и технологий их обработки.....	38
<b>Разработка полезных ископаемых.</b>	
<b>Геология. Геодезия .....</b>	<b>45</b>
<i>Монтянова А.Н., Вильчинский В.Б., Трофимов А.В.</i> К вопросу сокращения стоимости закладочных смесей на рудниках ЗФ ПАО «ГМК "Норильский никель"».....	45
<i>Хрунина Н.П., Чебан А.Ю.</i> Оценка влияния водонасыщения на дезинтеграцию высокоглинистых песков при разработке россыпей благородных металлов.....	50
<i>Еркушов В.Ю., Кононенко В.Н.</i> Воздействие динамической нагрузки на оползнеопасный участок автомобильной дороги в районе г. Сочи.....	56
<b>Литейное производство .....</b>	<b>61</b>
<i>Колокольцев В.М., Вдовин К.Н., Синицкий Е.В., Феоктистов Н.А.</i> Оценка эксплуатационной стойкости и моделирование технологии изготовления отливки «Зуб ковша экскаватора».....	61
<i>Савинов А.С.</i> Расчет напряженного состояния при внедрении асимметричных элементов затруднения литой детали в слой формовочной смеси переменной жесткости.....	64

## CONTENTS

<b>Conference proceedings.....</b>	<b>5</b>
<i>Erpalov M.V., Bogatov A.A.</i> Investigation of the causes of defects at octg upsetting. ....	7
<i>Chigintsev P.A., Semashko M.Yu., Sherkunov V.G.</i> Influence of technological parameters on the combined process of direct and inverse extrusion.....	12
<i>Bogatov A.A., Nukhov D.Sh.</i> Development of a method of blacksmith stretching without changing the shape and dimensions of the billet.....	16
<i>Dovzhenko N.N., Sidelnikov S.B., Arkhipov G.V., Konstantinov I.L., Dovzhenko I.N., Lopatina E.S., Voroshilov D.S., Feskov E.V.</i> Innovative technology of obtaining cathode rods for electrolyzers.....	21
<i>Fokin N.V., Kosmatsky Ya.I., Denysiuk S.A.</i> Research on deformability of a new high alloy and development of a technology enabling to extrude pipes from the alloy.....	27
<i>Bogatov N.A., Bogatov A.A., Salikhyanov D.R.</i> Development of manufacturing process of corrosion-resistant pipes.....	33
<i>Sidelnikov S.B., Dovzhenko N.N., Ditkovskaya Yu.D., Lopatina E.S., Lebedeva O.S., Rudnitsky E.A.</i> Creation of new jewelry alloys from multicomponent precious-metal systems and their processing technologies.....	38
<b>Mineral mining. Geology.</b>	
<b>Surveying .....</b>	<b>45</b>
<i>Montianova A.N., Vilchinsky V.B., Trofimov A.V.</i> On stowing materials cost reduction at the mines of the transpolar branch of the Norilsk nickel mining and metallurgical company PAO.....	45
<i>Khrunina N.P., Cheban A.Yu.</i> Assessment of the effect of water saturation on disintegration of sands with high clay content when mining precious metal placers.....	50
<i>Erkushov V.Yu., Kononenko V.N.</i> Impact of dynamic loads on the landslide-prone motorway section near Sochi.....	56
<b>Foundry.....</b>	<b>61</b>
<i>Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Sinitzky E.V., Feoktistov N.A.</i> Evaluation of service durability and simulation of a technology of "Excavator bucket tooth" casting.....	61
<i>Savinov A.S.</i> Stress state calculation when introducing asymmetric hindrance elements of cast details into sand layer of variable rigidity.....	64

<b>Обработка металлов давлением .....</b>	<b>71</b>	<b>Metal forming .....</b>	<b>71</b>
<i>Головизнин С.М., Покачалов В.В., Пыхов Л.Э.</i>		<i>Goloviznin S.M., Pokachalov V.V., Pykhov L.E.</i>	
Влияние скорости волочения		Effects of wire drawing speed	
на механические свойства		on mechanical properties	
высокопрочной арматурной проволоки .....	71	of high-strength reinforcing wire .....	71
<i>Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Вафин Р.К.</i>		<i>Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Vafin R.K.</i>	
Моделирование температурных полей в очаге		Simulation of temperature fields	
деформации при асимметричной прокатке		in a deformation zone during asymmetric rolling	
алюминиевых сплавов .....	75	of aluminum alloys .....	75
<i>Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Сverdлик М.К.</i>		<i>Pustovoitov D.O., Pesin A.M., Sverdlik M.K.</i>	
Математическое моделирование		Mathematical simulation of grain evolution	
эволюции зерна при асимметричной		during asymmetric rolling of pure aluminum	
прокатке чистого алюминия и сплава 7075 .....	81	and 7075 alloy .....	81
<b>Материаловедение и термическая</b>		<b>Materials Science and heat</b>	
<b>обработка металлов.....</b>	<b>88</b>	<b>treatment of metals .....</b>	<b>88</b>
<i>Полецков П.П., Гуцина М.С., Бережная Г.А.,</i>		<i>Poletskov P.P., Gushchina M.S., Berezhnaya G.A.,</i>	
<i>Алексеев Д.Ю., Набатчиков Д.Г.</i>		<i>Alekseev D.Yu., Nabatchikov D.G.</i>	
Исследование влияния режимов		Effect of heat treatment conditions	
термической обработки на механические		on mechanical properties of high-strength	
свойства высокопрочного листового проката .....	88	rolled steel sheet .....	88
<b>Стандартизация, сертификация</b>		<b>Standardization, certification,</b>	
<b>и управление качеством.....</b>	<b>93</b>	<b>and quality management .....</b>	<b>93</b>
<i>Валяева Г.Г., Пузанкова Е.А., Иванова Т.А.,</i>		<i>Valiaeva G.G., Puzankova E.A., Ivanova T.A.,</i>	
<i>Реент Н.А., Трофимова В.Ш.</i>		<i>Reent N.A., Trofimova V.Sh.</i>	
Моделирование и оценка уровня качества		Simulation and assessment	
металлопродукции в условиях принятой		of metal products quality under conditions	
производственной технологии .....	93	of the accepted production technology .....	93
<b>Надежность и долговечность</b>		<b>Reliability and Service Life</b>	
<b>металлургического оборудования .....</b>	<b>100</b>	<b>of Metallurgical Facilities .....</b>	<b>100</b>
<i>Паршин В.С., Карамышев А.П., Чигринский А.Е.,</i>		<i>Parshin V.S., Karamyshev A.P., Chygrynskiy A.E.,</i>	
<i>Чумакова Л.А., Некрасов И.И.</i>		<i>Chumakova L.A., Nekrasov I.I.</i>	
Построение математической модели		Mathematical model building	
динамического нагружения рычажной		of dynamic loading	
радиально-ковочной машины .....	100	of lever radial-forging machine .....	100
<b>Энергетика металлургии, энергосбережение</b>		<b>Power Engineering in Metallurgy, Energy Saving</b>	
<b>и электротехнические комплексы.....</b>	<b>105</b>	<b>and Electrical Complexes .....</b>	<b>105</b>
<i>Парсункин Б.Н., Полухина Е.И., Петрова О.В.</i>		<i>Parsunkin B.N., Polukhina E.I., Petrova O.V.</i>	
Производственно-экономические показатели		Key performance indicators for	
для динамической оптимизации		a dynamic optimisation	
энергосберегающего управления		of the energy-saving electric-arc	
электродуговыми технологическими агрегатами.....	105	units control .....	105
<b>Экономика, управление и рынок продукции.</b>		<b>Economics, management, and market of products.</b>	
<b>Менеджмент.....</b>	<b>112</b>	<b>Management .....</b>	<b>112</b>
<i>Майорова Т.В., Пономарева О.С.</i>		<i>Maierova T.V., Ponomareva O.S.</i>	
Методика оценки экономической эффективности		Economic efficiency assessment methodology	
экологического менеджмента предприятий		of metallurgical industry environmental	
металлургической отрасли .....	112	management.....	112
<b>Подготовка кадров для промышленности.....</b>	<b>117</b>	<b>Personnel training for industry.....</b>	<b>117</b>
<i>Болгова М.А., Подлегаев А.В.</i>		<i>Bolgova M.A., Podlegaev A.V.</i>	
Стратегии деятельности образовательных		Action strategy of educational institutions	
организаций высшего образования		of higher education under conditions	
в условиях модернизации высшего образования		of higher-education upgrading	
в Российской Федерации.		in the russian federation.	
Социально-экономический анализ .....	117	Social and economic analysis .....	117
<b>Сведения об авторах .....</b>	<b>123</b>	<b>Сведения об авторах.....</b>	<b>123</b>



# МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ УЧАСТНИКОВ КОНФЕРЕНЦИИ



В июне 2015 г. в Магнитогорском государственном техническом университете им. Г. И. Носова при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований состоялась Международная молодежная научно-практическая конференция «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства». Одной из главных целей конференции стало установление связей между молодыми учеными ведущих научных школ России и зарубежья, обмен опытом, апробация научных идей и общение с признанными учеными и специалистами-практиками. В ходе работы конференции были обсуждены фундаментальные и прикладные аспекты математического моделирования и оптимизации процессов обработки металлов давлением, развития теории и технологий производства высокотехнологичной импортзамещающей продукции.

В настоящем выпуске представлены научные статьи победителей и призеров конференции.





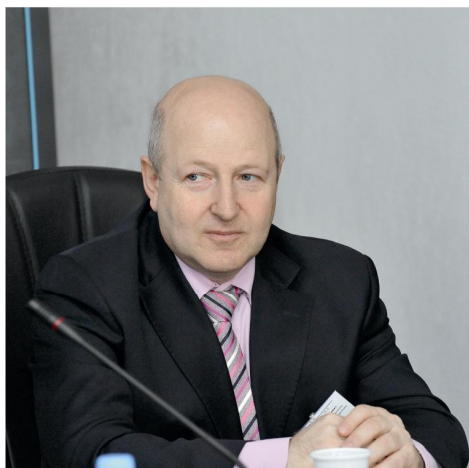


Фото: В. Шустиков, Т. Гридневский

УДК 621.774.39

## АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПРИ ВЫСАДКЕ КОНЦОВ ТРУБ НЕФТЯНОГО СОРТАМЕНТА\*

Ерпалов М.В., Богатов А.А.

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

**Аннотация.** В работе рассмотрены вопросы качества труб нефтяного сортамента с высаженными концами, производимых методом осадки на гидравлических прессах SMS Meeg. Основное внимание уделено причинам образования дефектов на внутренней поверхности изделий в виде незаполнений штампового пространства, расположенных непосредственно вблизи торца трубы. Результаты компьютерного моделирования процесса высадки позволили установить зависимость образования дефектов от технологических факторов, включая исходные размеры заготовок. Результаты промышленного эксперимента подтвердили основные положения компьютерного моделирования и позволили сформулировать взаимосвязанные требования к заготовке и калибровке инструмента, позволяющие исключить образование дефектов на внутренней поверхности труб. Результаты работы позволили интенсифицировать процесс высадки концов труб в один проход с увеличением коэффициента утолщения стенки приблизительно до 1,85.

**Ключевые слова:** насосно-компрессорные трубы, бурильные трубы, высадка концов труб, качество продукции, конечно-элементное моделирование, промышленное исследование.

### Введение

Высадка концов представляет собой локальное утолщение стенки трубы на заданном расстоянии от торца, при этом различают наружную, внутреннюю или комбинированную высадку [1, 2]. Утолщение концов труб позволяет повысить прочность резьбового или сварного соединения готового изделия с муфтой или замком, необходимыми для сборки насосно-компрессорных или бурильных труб в колонны при добыче нефти и газа. Большая потребность в трубах нефтяного сортамента в условиях осложнения добычи природных ресурсов обуславливает высокие требования к качеству изготавливаемых труб. Опыт производства труб с высаженными концами на гидравлических прессах SMS Meeg позволяет утверждать, что основным видом брака при высадке являются дефекты на внутренней поверхности труб в виде незаполнений штампового пространства, расположенных, как правило, в области перехода от высаженной части к телу трубы или непосредственно вблизи торца (рис. 1). Если в первом случае брак связан преимущественно с незавершенностью процесса высадки, т.е. с недопрессовкой металла в очаге деформации [3], то причины образования дефектов вблизи торца трубы неочевидны. Согласно [4] причиной это-

го вида брака является более низкая температура торца трубы по отношению к температуре остальной нагреваемой части заготовки. Однако на практике повышение температуры металла непосредственно у торца трубы перед деформацией не приводит к существенному повышению качества продукции. В связи с этим целью представленной работы является теоретическое и промышленное исследование причин образования внутренних дефектов в зависимости от технологических факторов, включающих размеры заготовки, условия трения на контактной поверхности с инструментом, температуру нагрева концов труб перед высадкой, а также температуру инструмента.

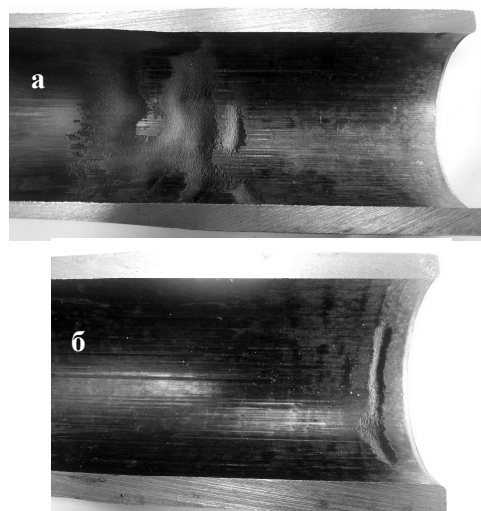


Рис. 1. Основные виды брака при высадке концов труб: а – незаполнение штампового пространства в переходной зоне от высаженной части к телу трубы; б – незаполнение штампового пространства непосредственно вблизи торца трубы

\* Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности №11.1369.2014/К от 18.07.2014 (Номер государственной регистрации: 114122470051).

Статья по материалам доклада на международной молодежной научно-технической конференции «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства», состоявшейся 15–17 июня 2015 г. в ФГБОУ ВПО «МГТУ» (г. Магнитогорск) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ №15-38-10185).

© Ерпалов М.В., Богатов А.А., 2015



### Конечно-элементное моделирование процесса высадки концов труб

Для решения поставленной задачи проведено компьютерное моделирование процесса высадки концов труб с применением метода конечных элементов, реализованного в программе Deform-3D\*. В качестве заготовок были выбраны насосно-компрессорные трубы с номинальными размерами 73,02×5,51 мм, изготавливаемые в соответствии с API 5CT [5], а также бурильные трубы 73,0×9,2 мм по ГОСТ Р 50278-92 [6]. Анализ допусков на диаметр и толщину стенки в соответствии с нормативной документацией на насосно-компрессорные трубы показал возможность изменения размеров заготовки в диапазоне от 73,23×4,82 до 73,81×6,2 мм, при этом допуск на максимальное значение толщины стенки установлен равным +12,5%.

Заготовки с указанными выше размерами были использованы при моделировании высадки со следующими технологическими параметрами процесса. По рекомендациям разработчиков программы Deform-3D показатель трения по Зибелю был установлен равным  $\psi = 0,3$ . Длина нагрева и длина высаживаемого конца трубы были определены в соответствии с действующей в ОАО «ПНТЗ» калибровкой инструмента. Температура нагрева концов труб непосредственно перед высадкой составила  $T_n = 1200^\circ\text{C}$ . Температура матриц принята равной  $T_m = 200^\circ\text{C}$ , а пуансона –  $T_p = 130^\circ\text{C}$ . Дополнительно были решены задачи с использованием заготовки размером 73,02×5,51 мм, учитывающие отдельно изменение показателя трения до 0,7, температуры нагрева металла до  $1100^\circ\text{C}$ ; температура торца заготовки  $T_t$  при этом изменялась от  $1100$  до  $1290^\circ\text{C}$ , а температура инструмента варьировалась в диапазоне от  $150$  до  $250^\circ\text{C}$  для матриц и от  $100$  до  $180^\circ\text{C}$  для пуансона. В общей сложности в ходе компьютерного моделирования процесса высадки концов труб было решено 10 задач.

В качестве материала заготовки принята сталь AISI-1045 из базы материалов программы Deform-3D, среда – вязкопластическая. Скорость перемещения пуансона принята равной 95 мм/с. Характерный размер сетки при разбиении заготовки на конечные элементы составил 2,9 мм, а общее количество элементов при длине заготовки 750 мм – от 200 000 до 275 000 в зависимости от размеров поперечного сечения трубы.

Результаты компьютерного моделирования свидетельствуют о наличии нескольких стадий процесса высадки труб, которые в основном согласуются с [7]. Установлено, что наибольшее влияние на образование внутренних дефектов

оказывает начальная стадия процесса высадки с момента соприкосновения пуансона с заготовкой до формирования контакта между поршневой частью пуансона (фланцем) и торцом трубы. При этом необходимо отметить, что в научной литературе стадия раздачи трубы традиционно не рассматривается, т.к. с точки зрения формоизменения металла она не представляет интереса. Однако указанная стадия процесса характеризуется интенсивным отводом тепла от нагретого конца трубы через поверхность контакта в холодный инструмент. В результате этого наряду с общим остыванием нагретого конца трубы имеет место локальное охлаждение (рис. 2), величина которого определяет изменение термомеханических свойств металла заготовки в небольшой области вблизи торца трубы.

Максимальный перепад температур вблизи контактной поверхности заготовки с инструментом в конце стадии раздачи трубы характеризуется величиной

$$K_T = \frac{T_{1\max} - T_{1\min}}{T_{1\max}}. \quad (1)$$

Далее в процессе потери устойчивости профиля трубы происходит постепенное увеличение наружного и внутреннего диаметра конца заготовки, в результате чего контакт трубы с пуансоном пропадает. После этого начинает заполняться штамповое пространство, образованное рабочей поверхностью матриц и пуансона, при этом заполнение очага деформации происходит в направлении от периферии к оси заготовки [8–10]. За счет неравномерности сопротивления деформации в осевом направлении, обусловленной охлаждением металла в начальной стадии процесса высадки, поле радиальной составляющей скорости течения частиц металла характеризуется наличием двух локальных максимумов (рис. 3).

В случае когда частицы металла, находящиеся на границе областей 1–2 (см. рис. 3), имеют большую радиальную скорость по отношению к частицам на границе 2–3, между поверхностью пуансона и внутренней поверхностью трубы формируется замкнутая воздушная полость, которая к моменту окончания деформации полностью не исчезает. Для количественного описания склонности металла трубы к образованию дефектов на внутренней поверхности высаженной части введен показатель наличия брака:

$$K_B = \frac{r_2 - r_1}{L_2}. \quad (2)$$

\* Лицензия кафедры «Обработка металлов давлением» УрФУ.





Рис. 2. Изменение температурного поля заготовки

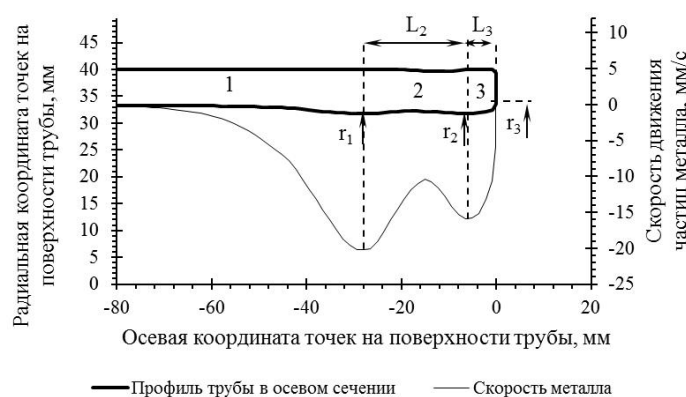


Рис. 3. Поле радиальной скорости перемещения частиц металла

В работе дополнительно введен параметр, характеризующий степень тесноты калибра:

$$K_K = \frac{2S}{D_M - d_{\Pi}}, \quad (3)$$

где  $S$  – толщина стенки трубы, мм;  $D_M$  – диаметр рабочей цилиндрической части матрицы, мм;  $d_{\Pi}$  – диаметр рабочей конической части пуансона в сечении фланца, мм.

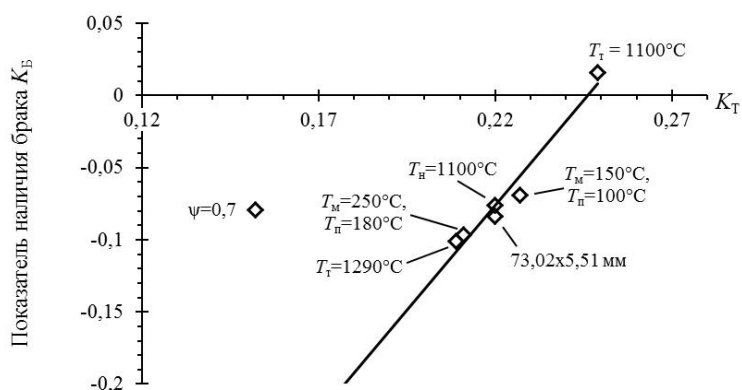
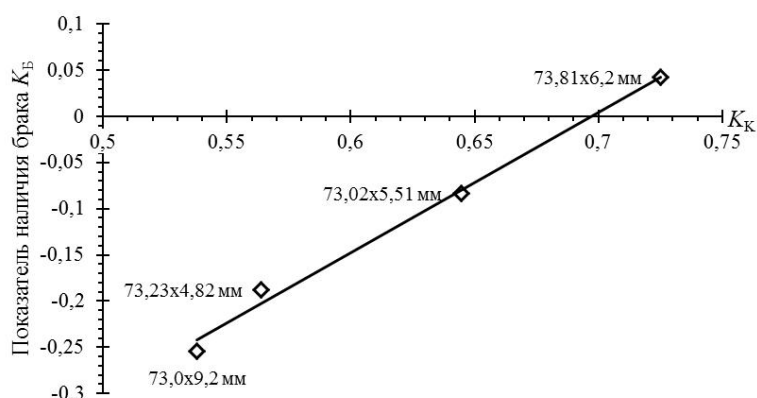
На рис. 4 представлена зависимость показателя наличия брака  $K_B$  от величины  $K_T$ , характеризующей неравномерность сопротивления деформации вдоль оси заготовки в конце стадии раздачи трубы. Из приведенной диаграммы видно, что внутренний дефект в виде незаполнения штампового пространства образуется при температуре торца трубы  $T_T = 1100^\circ\text{C}$ , что на  $100^\circ\text{C}$  ниже температуры нагрева остальной части высаживаемой части трубы. К незначительному увеличению склонности к образованию внутренних дефектов на поверхности труб приводит уменьшение температуры инструмента. Ухудшение условий трения на контактной поверхности с матрицами приводит к повышению неравномерности деформации конца трубы [10], что, в свою очередь, приводит к увеличению склонности металла трубы к образованию внутренних дефектов. Это видно из рис. 4 – значение

величины  $K_B$  резко отличается от линии тренда.

Повышение температуры инструмента, а также температуры торца по отношению к остальной нагреваемой части трубы обеспечивает более равномерную конца заготовки. Следует отметить, что в силу равенства величин  $K_T$  в случаях нагрева концов труб до температур  $1200$  и  $1100^\circ\text{C}$  склонность металла к образованию внутренних дефектов также одинакова.

На рис. 5 представлена зависимость показателя наличия брака  $K_B$  от величины  $K_K$ , характеризующей толщину стенки заготовки относительно размеров штампового пространства. Видно, что с увеличением тесноты калибра склонность к образованию брака увеличивается, а при высадке концов труб  $73,81 \times 6,2$  мм наблюдаются внутренние незаполнения штампового пространства вблизи торца трубы. Статистический анализ опытных данных, несмотря на малое их количество, позволяет утверждать, что независимо от размеров трубы и параметров калибровки имеет место линейная связь между величинами  $K_B$  и  $K_K$ . Таким образом, была установлена связь между максимальной толщиной стенки, при которой наблюдается образование дефектов, с параметрами калибровки инструмента:

$$S^{\max} = 0,3486 \cdot (D_M - d_{\Pi}). \quad (4)$$

Рис. 4. Зависимость показателя наличия брака  $K_B$  от величины  $K_T$ Рис. 5. Зависимость показателя наличия брака  $K_B$  от величины  $K_K$ 

### Промышленное исследование процесса высадки концов труб

С целью проверки основных результатов теоретического исследования был проведен промышленный эксперимент на гидравлическом прессе SMS Meer ОАО «ПНТЗ». Для этого был выполнен отбор заготовок с номинальным размером  $73,02 \times 5,51$  мм по критерию средней толщины стенки. Согласно (4) для действующей в ОАО «ПНТЗ» калибровки инструмента максимальное значение толщины стенки, при которой на внутренней поверхности трубы начинают образовываться дефекты, составляет 5,96 мм. Для промышленного эксперимента, направленного на изучение условий образования внутренних дефектов вблизи торца труб, были отобраны заготовки со средними значениями толщины стеки 5,28, 5,36, 5,49, 5,79, 5,87 и 6,09 мм. Высадка производилась при длине нагрева концов труб 310 мм, температуре нагрева  $1290^\circ\text{C}$ , давлении в главном гидроцилиндре пресса 10 МПа и времени задержки перед началом отведения пуансона в обратном направлении 1,8 с.

По результатам промышленного эксперимента установлено, что единственной трубой, у которой обнаружены внутренние дефекты в виде незаполнения штампового пространства, является

труба, имеющая среднее значение толщины стенки 6,09 мм, что превышает критическое значение 5,96 мм, установленное по результатам компьютерного моделирования. Для всех остальных заготовок, среднее значение толщины стенки которых меньше критического, внутренних дефектов не обнаружено. Таким образом, в промышленных условиях подтверждена достоверность выражения (4), позволяющего устанавливать требования либо к заготовкам, поступающим на операцию высадки, либо к калибровке инструмента исходя из фактических размеров труб.

Из рис. 5 видно, что в случае высадки концов бурильных труб ПН  $73 \times 9$  в соответствии с ГОСТ Р 50278-92 в один проход параметр, характеризующий тесноту калибра, является минимальным. То есть за счет отсутствия стадии раздачи трубы образование внутренних дефектов вблизи торца исключено. Для проверки возможности высадки концов бурильных труб ПН  $73 \times 9,2$  мм в промышленных условиях в один проход в ОАО «ПНТЗ» была проведена соответствующая опытная работа. В результате успешно были высажены концы труб в объеме 30 т, при этом коэффициент утолщения стенки трубы составил около 1,85. Дефектов по внутренней поверхности высаженных концов обнаружено не было (рис. 6), что также подтверждает результаты теоретического исследования.

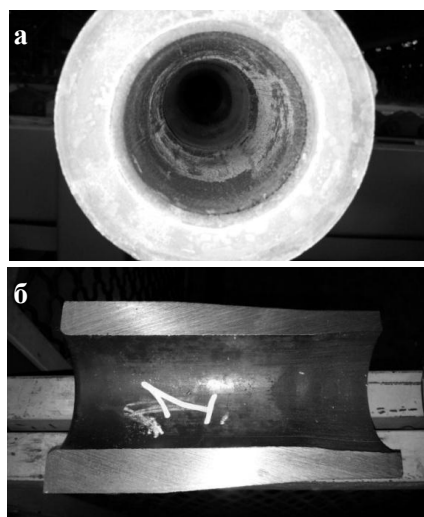


Рис. 6. Высаженный конец буровой трубы ПН 73×9: а – вид с торца; б – высаженный конец трубы в разрезе

### Заключение

В работе выполнено теоретическое и промышленное исследование процесса высадки концов труб в один проход. Основное внимание уделено качеству внутренней поверхности получаемых изделий. В результате компьютерного моделирования установлено влияние технологических параметров процесса высадки на склонность металла к образованию дефектов на внутренней поверхности в виде незаполнений штампового пространства. Установлена и подтверждена в промышленных условиях зависимость между максимально допустимой толщиной стенки и параметрами калибровки технологического инструмента (4).

### Список литературы

1. Освоение технологии высадки концов труб нефтяного сортамента на ОАО «ПНТЗ» / Ерпалов М.В. [и др.] // ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии: материалы Международ. науч.-техн. конгресса. М.: Изд-во ООО «Белый ветер», 2014. Т.2. С. 64–69.
2. Ерпалов М.В., Кондратьева Г.Н., Богатов А.А. Модернизация технологии высадки концов труб с целью повышения эффективности гидравлического прессы SMS Meer // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: материалы Международ. конференции. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. С. 581–592.
3. Ерпалов М.В. Исследование технологического процесса высадки концов труб на гидравлических прессах с целью повышения их качества: отчет о НИР (заключ.) / Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б.Н.Ельцина; рук. А.А. Богатов; исп. М.В. Ерпалов. Екатеринбург, 2013. 11 с.
4. Мюллер В., Арем Р. Технология работы. Обжимной пресс: презентация / ОАО «ПНТЗ». Первоуральск, 2009. 28 с.
5. API 5CT. Обсадные и насосно-компрессорные трубы. 9-е изд. Введ. 2012–01–01. Американский институт нефти, 2011.
6. ГОСТ Р 50278-92. Трубы буровые с приваренными замками. Технические условия. Введ. 1994-01-01. М.: Стандартинформ, 2010.
7. Трубы для нефтяной промышленности / Ткаченко В.А. [и др.]. М.: Металлургия, 1986. 256 с.
8. Остренко В.Я. Технологические особенности высадки труб в закрытых матрицах // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1965. №1. С. 33–35.
9. Остренко В.Я. Аналитический метод определения силовых и энергетических параметров высадки концов труб // Производство труб: сб. тр. ВНТИТИ. М.: Металлургия, 1968. №20. С. 223–230.
10. Теория обработки металлов давлением / Тарновский И.Я. [и др.]. М.: Металлургияиздат. 1963. С. 382–387.

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

## INVESTIGATION OF THE CAUSES OF DEFECTS AT OCTG UPSETTING

**Erpalov Mikhail Viktorovich** – Research Assistant, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: m.v.erpalov@urfu.ru.

**Bogatov Alexandr Alexandrovich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Metal Forming Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: omd@urfu.ru.

**Abstract.** The paper deals with the quality issues of OCTG with upset ends produced on SMS Meer hydraulic presses. It focuses on the causes of defects appearing on the inner surface of products in the form of underfilled pass near the pipe end. The results of computer simulation of upsetting have established dependence of defects formation on technological factors, including original workpiece sizes. The industrial experiment results have confirmed the key points of the computer simulation and allowed formulation of requirements to a workpiece and tool calibration which eliminate defects formation on the inner surface of pipes. The results of this work have made it possible to intensify the pipe end upsetting process in a single pass with an increase in a wall-thickening ratio up to 1.85.

**Keywords:** Tubing, drill pipe, pipe end upsetting, product quality, finite element modeling, industrial research.

### References

1. Erpalov M.V. [et al.]. Development of OCTG ends upsetting technology at JSC «PNTZ». *OMD 2014. Fundamentalnye problemy. Innovatsionnye materialy i tekhnologii: materialy Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo kongressa* [OMD 2014. Fundamental problems. Innovative Materials and Technologies: Proceedings of the International scientific and engineering Congress]. Moscow: Publishing House «Bely veter», 2014, vol. 2, pp. 64-69.
2. Erpalov M.V., Kondratieva G.N., Bogatov A.A. Upgrading pipe-ends upsetting technology in order to improve performance of SMS Meer hydraulic presses. *Innovatsionnye tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii: materialy Mezhdunarodnoj konferentsii*

- [Innovative technologies in metallurgy and mechanical engineering: Proceedings of the International Conference]. Ekaterinburg: Publishing House Ural. univ, 2014, pp. 581-592.
3. Erpalov M.V. The research of the pipe-ends upsetting process on hydraulic presses to enhance their quality: The final research report. Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin; Supervisor A.A. Bogatov; Executor M.V. Erpalov. Ekaterinburg, 2013. 11 p.
  4. Mueller W., Arem R. Work technology. Upsetting press: Presentation. JSC «PNTZ». Pervouralsk, 2009. 28 p.
  5. API 5CT. Specification for Casing and Tubing. Ninth edition. Effective Date 2012-01-01. Published by American Petroleum Institute (API), 2011.
  6. GOST R 50278-92. Gosudarstvennyj Standart 50278-92. Truby buril'nye s privarennyimi zamkami. Tekhnicheskie usloviya [State Standart 50278-92. Drill pipes with welded locks. Technical conditions]. Moscow: Publishing House Standartinform, 2010.
  7. Tkachenko V.A. [et al.]. Truby dlya nefyanoj promyshlennosti [The pipes for the oil industry]. Moscow: Metallurgy, 1986. 256 p.
  8. Ostrenko V.Ja. Technological features of pipes upsetting in closed tools. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 1965, no. 1, pp. 33-35.
  9. Ostrenko V.Ja. Analytical method of determining the energy-power parameters of the pipe ends upsetting. *Proizvodstvo trub: sbornik trudov VNTITI* [Production of pipes: Proceedings VNTITI]. Moscow: Metallurgy, 1968, no. 20, pp. 223-230.
  10. Tarnowski I.Ja. [et al.]. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Moscow: Metallurgizdat, 1963, pp. 382-387.

Ерпалов М.В., Богатов А.А. Анализ причин возникновения дефектов при высадке концов труб нефтяного сортамента // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 7–12.

Erpalov M.V., Bogatov A.A. Investigation of the causes of defects at octg upsetting. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 7–12.

УДК 621.777.01

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СОВМЕЩЕННЫЙ ПРОЦЕСС ВЫСАДКИ, ПРОШИВКИ И ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ\*

Чигинцев П.А., Семашко М.Ю., Шеркунов В.Г.

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

**Аннотация.** В статье описывается математическое моделирование совмещенного процесса высадки, прошивки и обратного выдавливания, зависимость результатов от варьируемых параметров.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, интенсивная пластическая деформация, рационализация, прессование.

### Введение

Математическое моделирование малоисследованных процессов позволяет в значительной степени увеличить шанс удачного проведения натурного эксперимента, снизить количество дорогостоящих итераций при его осуществлении. Также подобные расчеты, при правильном задании начальных и граничных условий, позволяют провести рационализацию исследуемого процесса с целью повышения его эффективности. В последнее время математическое моделирование применяется для решения как производственных, так и научно-практических задач. Для этого используются различные программные

пакеты, в число которых входят всемирно известные ANSYS, DEFORM, ABACUS, LS-DYNA, отечественный продукт Q-Form, а также программы собственного авторства [1–4].

Для моделирования совмещенного процесса высадки, прошивки и обратного выдавливания [5] наиболее подходящими являются специализированные программы, предназначенные для расчета процессов объемной штамповки, которыми являются Deform и Q-Form. Таким образом, для рационализации конструктивных и технологических параметров совмещенного процесса высадки, прошивки и обратного выдавливания был выбран пакет Deform ввиду большого опыта проведения в нем различных расчетов [6].

Целью рационализации конструкции технологической оснастки для реализации совмещенного процесса высадки, прошивки и обратного выдавливания, а также его технологических параметров является повышение эффективности процесса в целом, а также определение влияния на конечный результат каждого из рассматрива-

\* Статья по материалам доклада на международной молодежной научно-технической конференции «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства», состоявшейся 15–17 июня 2015 г. в ФГБОУ ВПО «МГТУ» (г. Магнитогорск) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ №15-38-10185).

© Чигинцев П.А., Семашко М.Ю., Шеркунов В.Г., 2015



емых параметров. При этом эффективность стоит воспринимать не исключительно как меру отражения максимальных накопленных деформаций за один цикл, что в значительной мере определяет физико-механические свойства получаемой заготовки, но и как характеристику равномерности процесса по времени и объему.

**Теория и методы исследования**

Конструктивно технологическая оснастка для реализации совмещенного способа высадки, прошивки и обратного выдавливания состоит из трех основных элементов: пуансона, основания и матрицы. Последняя является наиболее важным из них и во многом определяет течение металла. Так, в процессе исследования рассматривались два основных параметра матрицы: угол сопряжения канала матрицы и ее полости  $\alpha$  и соотношение их диаметров  $k$  (рис. 1):

$$k = d/D.$$

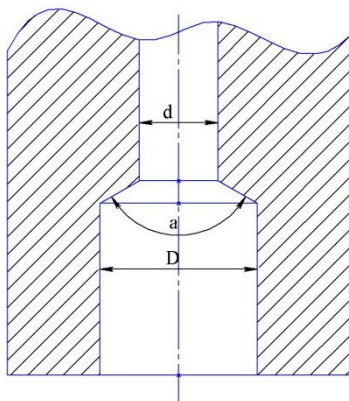


Рис. 1. Конструктивные элементы матрицы

В качестве технологических параметров были выбраны скорость  $v$  и температура  $T$  деформирования. При этом движение инструмента на прямом и обратном ходе заготовки принимается одинаковой, а температура задается равной для заготовки и всей технологической оснастки. Исходные данные для дробного факторного эксперимента представим в виде таблицы (табл. 1).

Таблица 1

Исходные данные дробного факторного эксперимента

Фактор	Значение фактора	Базовое значение «0»	Верхний предел «+1»	Нижний предел «-1»
$X_1$	Температура $T$ , °C	150	180	120
$X_2$	Угол перехода матрицы $\alpha$ , град	75	90	60
$X_3$	Скорость деформирования $v$ , мм/с	1/6	1/4	1/12
$X_4$	Соотношение диаметров $k$	5/16	4/8	5/8

Таким образом, с учетом изменения четырех параметров сформирован план дробного факторного эксперимента, также представленного в виде таблицы (табл. 2).

В качестве критерия эффективности процесса была выбрана накопленная пластическая деформация  $\bar{\epsilon}^P$  (strain effective), определяемая по формуле

$$d\bar{\epsilon}^P = f(d\epsilon^P) = \sqrt{\frac{2}{3} \left( d\epsilon_x^{P2} + d\epsilon_y^{P2} + d\epsilon_z^{P2} + \frac{1}{2} d\gamma_{xy}^{P2} \right)};$$

$$\bar{\epsilon}^P = \int d\bar{\epsilon}^P \neq f(\epsilon^P).$$

Данный параметр взят за основу ввиду того, что по графикам его распределения можно легко оценить равномерность деформирования по времени процесса, а также по объему за счет рассмотрения одиннадцати точек, расположение которых позволяет с достаточной точностью описать характер деформирования всей заготовки: четыре из них находятся на ее оси, четыре – в контактном слое и три – в толще материала (на расстоянии половины радиуса от оси) (рис. 2).

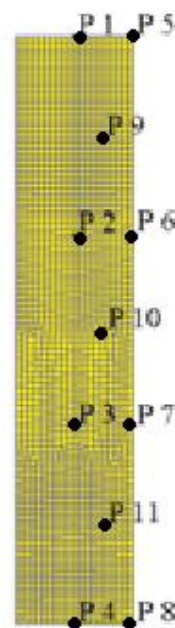
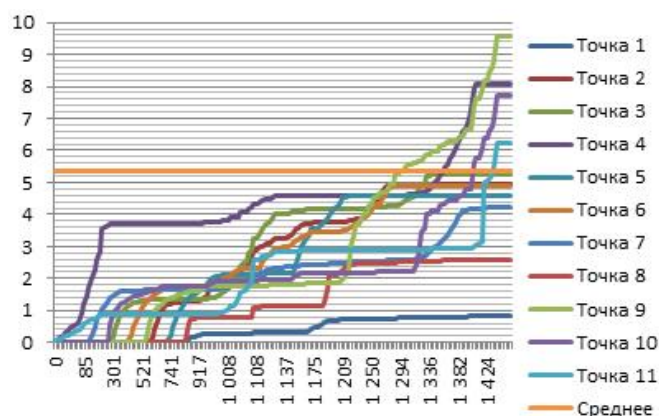


Рис. 2. Точки измерения деформаций

Для каждого из математических расчетов был построен график, отражающий изменение показательного параметра за все время процесса для каждой из одиннадцати точек (рис. 3). Также на графике присутствует горизонтальная линия, показывающая средний уровень показателя по итогам процесса.

Рис. 3. Пример графика изменения  $\bar{\varepsilon}^P$ 

На графиках видно, что процесс деформирования происходит крайне неравномерно. Для графика каждой точки характерны горизонтальные и наклонные участки. Первые отвечают моментам времени, когда материал в данной точке не деформируется. Наклонные участки, наоборот, – времени деформирования материала. Крутизна же наклонного участка показывает, насколько интенсивно деформируется участок заготовки в определенный момент времени, что соответствует представлениям о том, что интенсивность деформации является дифференциальной функцией от полной деформации.

Подобные всплески можно объяснить наличием зон наибольшей интенсивности деформаций, при попадании в которые происходит активное деформирование участка заготовки, что, в свою очередь, отражается на графике накопленных деформаций как наклонный участок. Таких участков в сечении заготовки несколько. Первый из них располагается под углом близким к  $135^\circ$  по отношению к вектору скорости (на прямом ходе, соответствующем приложению усилия деформирования к пуансону) и расходится от участка максимальных деформаций, находящихся у кромки переходной части матрицы (рис. 4). Вторая подобная зона также берет начало у вышеописанной кромки, но располагается под углом близким к  $45^\circ$  к вектору скорости (рис. 5).

Неодинаковую интенсивность деформирования разных точек, разницу крутизны последовательных наклонных участков на одной кривой, а следовательно, и неравномерность интенсивности деформаций по объему и времени соответственно можно объяснить расположением точек относительно кромки переходной части матрицы. Так, максимально приближенные к ней точки деформируются наиболее интенсивно, но с меньшей продолжительностью, а точки более удаленные – со значительно меньшей интенсивностью, но в течение продолжительного периода времени. При этом средний уровень интенсив-

ности деформации в первом участке, ориентированном к оси заготовки выше, чем во втором, ориентированном к образующей.

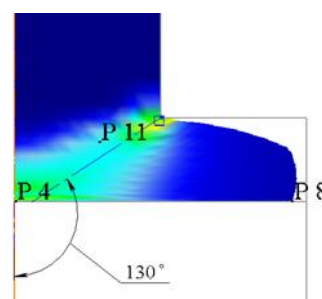


Рис. 4. Первый участок интенсивного деформирования

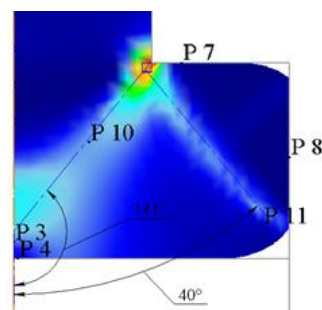


Рис. 5. Второй участок интенсивного деформирования

### Результаты и их обсуждение

Анализ полученных результатов позволил оценить несколько важнейших показателей совмещенного процесса высадки, прошивки и обратного выдавливания. Первым из них является средний по объему уровень накопленной деформации для каждого варианта сочетаний варьируемых параметров. Оценка этого показателя позволяет говорить об эффективности той или иной конфигурации с точки зрения повышения физико-механических свойств полученной заготовки: чем выше уровень накопленной деформации, тем больше изменение за один цикл (рис. 6).

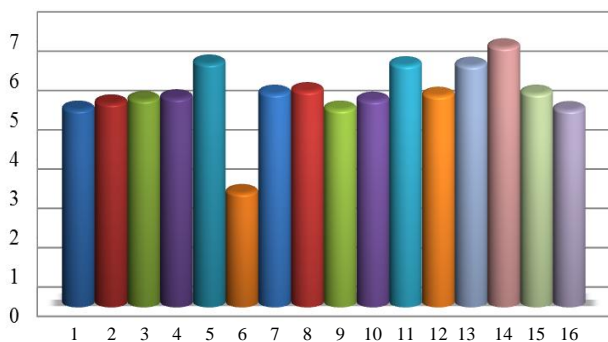


Рис. 6. Средняя накопленная деформация

Однако необходимо не только придать как можно большие деформации заготовке, но сделать это как можно равномернее. Для этого рассматривается показатель, характеризующий усредненную разницу накопленной деформации в каждой из рассматриваемых точек и ее среднее значение, что позволяет количественно оценить равномерность деформирования заготовки по объему (рис. 7).

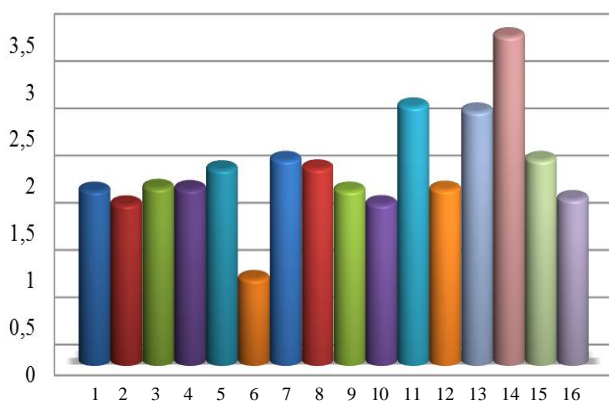


Рис. 7. Отклонение от средней деформации

## Заключение

Расположение зон повышенных значений интенсивности говорит о преобладании сдвиговых деформаций в процессе, что позволяет сделать вывод о весьма высокой эффективности процесса с точки зрения реализации интенсивной пластической деформации

Наибольшее влияние на эффективность совмещенного процесса оказывают конструктивные характеристики технологической оснастки, а существующая конструкция имеет значительный потенциал повышения эффективности как с точки зрения уровня накопленной деформации, так и по части равномерности свойств и структуры получаемых заготовок.

## Список литературы

1. Тарасов А.Ф., Алтухов А.В. Моделирование процесса интенсивного пластического деформирования заготовок по схеме реверсивного сдвига // *Металлургические процессы и оборудование*. 2013. №4. С. 47–54.
2. Камалетдинов И., Юсупов В., Биба Н. Разработка и исследование математической модели процесса равноканального углового прессования // *Машины, Технологии, Материалы*. 2013. С. 122–124.
3. Рудской А.И., Золотов А.М., Ганин С.В. Моделирование процесса равноканального углового прессования заготовок из порошковых композиций на основе алюминия и редкоземельных металлов в капсулах // *Цветные металлы*. №1, спец. вып.
4. Константинов Д.В., Корчунов А.Г. Мультимасштабное компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2015. № 1. С. 36–43. Пат. 2424076 РФ. Способ пластического структурообразования и устройство для его осуществления / Семашко М.Ю., Трусовский В.И., Шеркунов В.Г.
5. Семашко М.Ю., Шеркунов В.Г., Чигинцев П.А. Моделирование в среде Deform микроструктуры металлических образцов, подвергнутых интенсивной пластической деформации // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. № 1. С. 57–61.

## INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

### INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE COMBINED PROCESS OF DIRECT AND INVERSE EXTRUSION

**Chigintsev Pavel Andreevich** – Postgraduate Student, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: 4iga90@mail.ru.

**Semashko Marina Yurevna** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: mara1979@mail.ru.

**Sherkunov Viktor Georgievich** – D.Sc. (Eng.), Professor, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.

**Abstract.** The article describes a mathematical modeling of a combined process of direct and inverse extrusion, dependence of results on variable parameters.

**Keywords:** Mathematical modeling, severe plastic deformation, rationalization, extrusion.

## References

1. Tarasov A.F., Altukhov A.V. Modeling of the reverse-shearing severe plastic deformation of workpieces. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie* [Metallurgical processes and equipment]. 2013, no. 4, pp. 47–54.
2. Kamaletdinov I., Yusupov V., Biba N. Development and study of a

- mathematical model of equal channel angular extrusion. *Mashiny, Tekhnologii, Materialy* [Machines, Technologies, Materials]. 2013, pp. 122-124.
- Rudskoi A.I., Zolotov A.M., Ganin S.V. Simulation of equal channel angular extrusion of workpieces from aluminum-based pulverulent compositions and capsular rare-earth metals. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals]. No. 1, *Spets.vypusk* [Special edition].
  - Konstantinov D.V., Korshunov A.G. Multi-scale computer simulation of metal forming processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 1, pp. 36-43.
  - Semashko M.Yu., Truskovskii V.I., Sherkunov V.G. *Sposob plasticheskogo strukturoobrazovaniya i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Plastic structuring and a plastic-structuring facility]. Patent RF, no. 2424076.
  - Semashko M.Yu., Sherkunov V.G., Chigintsev P.A. Deform-based microstructure simulation of metallic samples exposed to severe plastic. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 1, pp. 57-61.

Чигинцев П.А., Семашко М.Ю., Шеркунов В.Г. Исследование влияния технологических параметров на совмещенный процесс высадки, прошивки и обратного выдавливания // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 12–16.

Chigintsev P.A., Semashko M.Yu., Sherkunov V.G. Influence of technological parameters on the combined process of direct and inverse extrusion. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 12–16.

УДК 621.73.043

## РАЗРАБОТКА СПОСОБА КУЗНЕЧНОЙ ПРОТЯЖКИ БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ ИСХОДНОЙ ЗАГОТОВКИ\*

Богатов А.А., Нухов Д.Ш.

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

**Аннотация.** В работе рассмотрена идея обеспечения знакопеременной деформации при протяжке литых слитков без изменения исходных формы и размеров. Способ осуществляется применением кузнечных штампов [1], имеющих два участка рабочей поверхности – гладкий и профильный. Была определена рациональная гравюра профильной части штампа и режимы обжатий, которые обеспечивают высокую однородность деформации во всем объеме заготовки после протяжки.

**Ключевые слова:** литая структура; знакопеременная деформация; дисперсность структуры; математическое моделирование; напряженное и деформированное состояние; показатели напряженного состояния; степень деформации; кузнечная протяжка слитка; штамп; обжатие заготовки.

### Введение

В настоящее время одной из актуальных проблем обработки металлов давлением является, с одной стороны, получение высококачественной литой заготовки, а с другой – поиск новых технологических схемковки и прокатки, обеспечивающих проработку литой структуры и высокий уровень механических свойств и экс-

плуатационных характеристик металлургической продукции. Известно, что знакопеременная деформация способствует проработке литой и формированию мелкозернистой структуры [2–11]. Авторами работы исследован новый способ протяжки, при котором осуществляется знакопеременная деформация с равномерной проработкой литой структуры по сечению заготовки.

### Выбор рациональных размеров инструмента деформации в условиях гладкой деформации

Применение инструмента с рабочей поверхностью в виде углублений и выступов с формой цилиндрических сегментов позволяет получить обжатую на первом этапе заготовку с волнистой поверхностью. На следующем этапе обжатия

\* Статья по материалам доклада на международной молодежной научно-технической конференции «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства», состоявшейся 15–17 июня 2015 г. в ФГБОУ ВПО «МГТУ» (г. Магнитогорск) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ №15-38-10185).

© Богатов А.А., Нухов Д.Ш., 2015



плоскими штампами выравнивают поверхность поковки и осуществляют знакопеременную деформацию, сохраняя первоначальную форму и размеры заготовки (рис. 1).

В работе поставлена задача определить рациональную гравюру профильного участка штампа, которая при минимальном обжатии заготовки обеспечивает полное заполнение полости углублений штампа, а также равномерное распределение деформации во всем объеме поковки после обжатия поковки на гладкой части штампа. Для определения рациональной гравюры штампа введены следующие соотношения размеров очага деформации:  $e/r$ ;  $r/h$ ;  $\Delta h/h$ , где  $r$  – радиусы цилиндрических сегментов углублений и выступов;  $e$  – расстояния между линиями центров цилиндрических поверхностей выступов и углублений;  $h$  – высота заготовки;  $\Delta h$  – абсолютное обжатие по высоте заготовки в области выступов (рис. 2, сечение II-II).

Результаты решения задач КЭ-моделирования процесса протяжки поволоки в штампах с различными параметрами очага деформации ( $r/h$ ) и величинами относительного обжатия заготовки ( $\Delta h/h$ ) показали, что при малых соотношениях  $e/r \leq 1$  не удается добиться полного заполнения металла в углубления бойка [12, 13], даже при обжатии  $\frac{\Delta h}{h} \cdot 100\% = 20\%$ . В результате было показано, что значение параметра  $e/r$  необходимо выбирать в диапазоне 1,5–1,75, так как в этом случае металл полностью заполняет углубления бойка, обеспечивая полную проработку литой структуры во всем объеме заготовки. При обжатии в штампах с  $e/r < 1,5$  металл не заполняет углубления бойка, при последующей деформации заготовки на гладком участке бойка не удается обеспечить равномерную знакопеременную деформационную проработку во всем объеме слитка без изменения формы и размеров исходной заготовки. При обжатии заготовки штампами с  $e/r > 1,75$  не обеспечивается проникновение деформации в осевую зону слитка по сравнению с поверхностными слоями.

В работе выполнено исследование зависимости формоизменения и деформированного

состояния металла в очаге деформации от величины подачи. В результате разработана методика выбора рационального значения подачи заготовки. Величина подачи была задана значениями  $l$ :  $\frac{b}{h}$ ;  $\frac{2b}{h}$ ;  $\frac{6b}{h}$ ;  $\frac{10b}{h}$ ;  $\frac{14b}{h}$ , где  $h$  – высота заготовки,  $b$  – ширина выступа (углубления) штампа. Она определяется из выражения

$$b = \sqrt{4r \cdot \Delta h_{\phi} - \Delta h_{\phi}^2}, \text{ где } \Delta h_{\phi} = 2\Delta - \text{ величина}$$

обжатия по высоте  $h$  (рис. 3). Высота заготовки принята равной  $h = 300$  мм, обжатие по высоте  $\Delta h/h = 0,1$ . Принимая значения  $r = 100$  мм, ширина выступов и углублений будет определена выражением

$$b = \sqrt{4r \cdot \Delta h_{\phi} - \Delta h_{\phi}^2} = \sqrt{4r \cdot 0,1h - (0,1h)^2}.$$

Заполнение металлом элементов штампа количественно оценивали через коэффициент заполнения  $\delta = \frac{h_{\text{не}}}{\Delta} \cdot 100\%$ , где  $h_{\text{не}}$  – высота элемента поковки, заполнившего углубление штампа;  $\Delta = r - 0,5e$  – высота углубления штампа (см. рис. 3). Неравномерность деформации по высоте слитка оценивалось с помощью коэффициента вариации  $S/\bar{\varepsilon}_u$ , где  $\bar{\varepsilon}_u$  – среднее значение накопленной степени деформации по высоте, которое определялось для двух сечений (I – под углублением и II – под выступом штампа) по шести точкам из выражения  $\bar{\varepsilon}_u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ui}$ ,  $i$  – номер частицы, а  $S = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{ui} - \bar{\varepsilon}_u)^2 \right]^{1/2}$  – среднеквадратичное отклонение. Исследования проводили в программном комплексе DEFORM-3D. В ходе решения задачи были приняты следующие допущения: задача решается в изотермических условиях, модель материала заготовки – вязкопластическая среда (Сталь AISI-1045, аналогичная стали Ст45), материал штампов – недеформируемая жесткая среда. Показатель трения (по Зибелю) на контактной поверхности принят равным  $\psi = 0,6$ . Для обеспечения высокой точности результатов расчета минимальный размер элемента был принят равным 3 мм при высоте поковки 300 мм. Твердотельная модель протяжки представлена на рис. 4

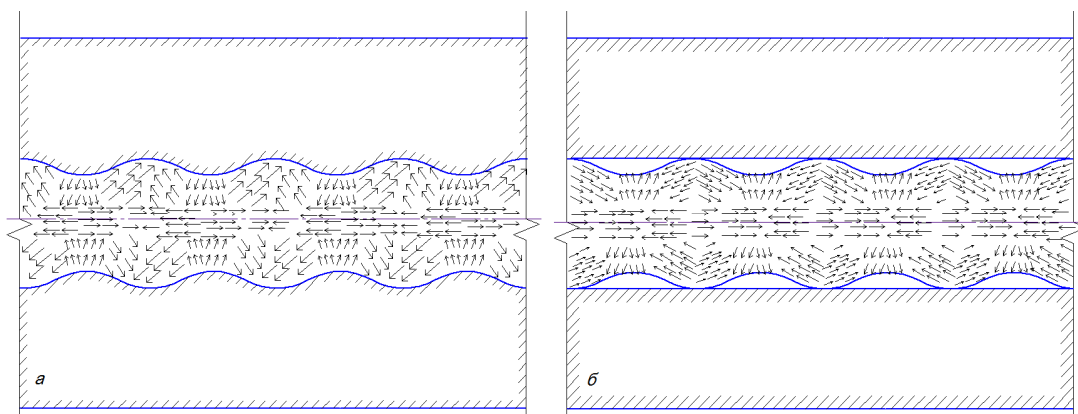


Рис. 1. Направление скорости движение частиц металла при обжатии на профильном (а) и гладком участках штампов (б)

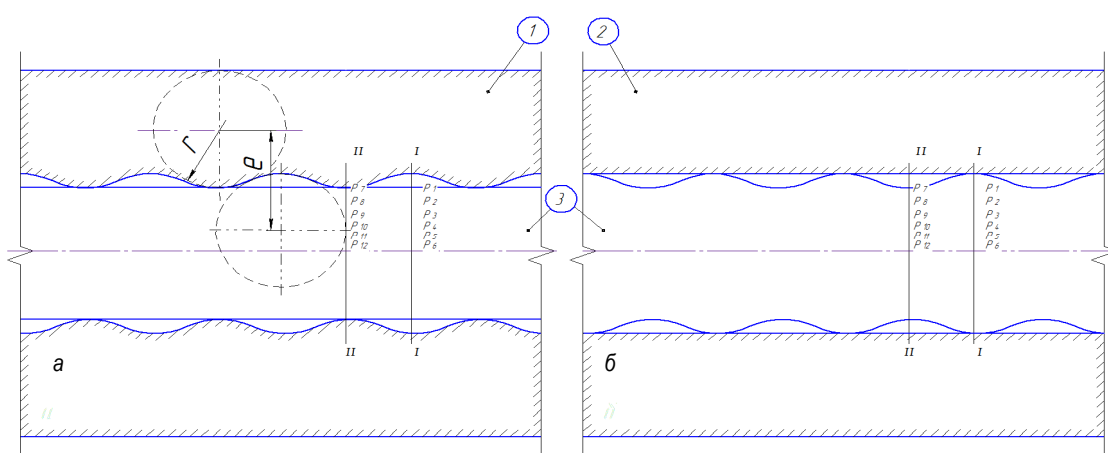


Рис. 2. Деформирование заготовки штампами в два этапа – на профильном (а) и гладком (б) участках

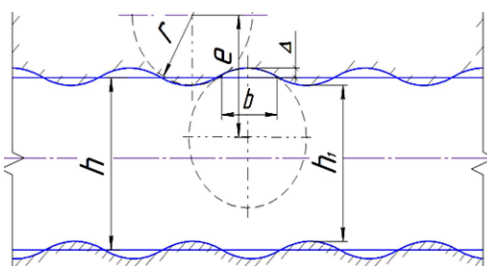


Рис. 3. Очаг деформации при обжатии поковки на профильном участке штампа

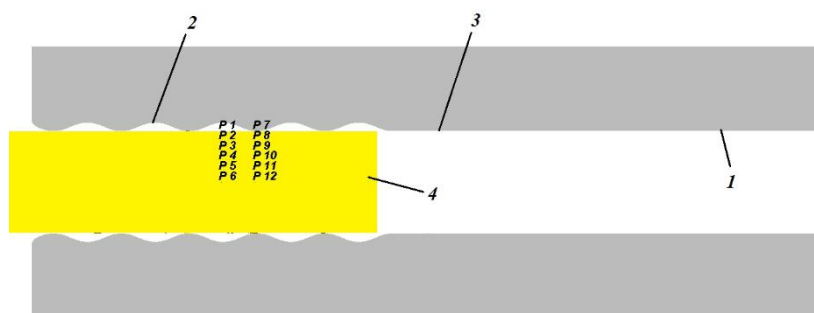


Рис. 4. Обжатие заготовки в штампах: 1 – бойки; 2 и 3 – профильные и гладкие участки рабочей поверхности инструмента; 4 – заготовка

Результаты расчетов, характеризующих влияние подачи ( $l$ ) на деформацию заготовки в очаге деформации, показали, что удовлетворительное заполнение металлом углублений штампа удается добиться при  $l = \frac{10b}{h}$  и  $l = \frac{14b}{h}$ . Коэффициент заполнения углублений в обоих случаях соответственно равен  $\delta = 85\%$  и

$\delta = 95\%$ . На рис. 5 представлены расчеты степени деформации и характер распределения  $\epsilon_{ui}$  по высоте заготовки для двух сечений: I – под углублениями (рис. 5, а, б) и II – под выступами (рис. 5, в, г). На рис. 6 представлены значения коэффициента вариации  $S/\overline{\epsilon_{\Sigma u}}$ , характеризующего неравномерность распределения суммарной степени деформации по высоте после двух этапов обжатия.

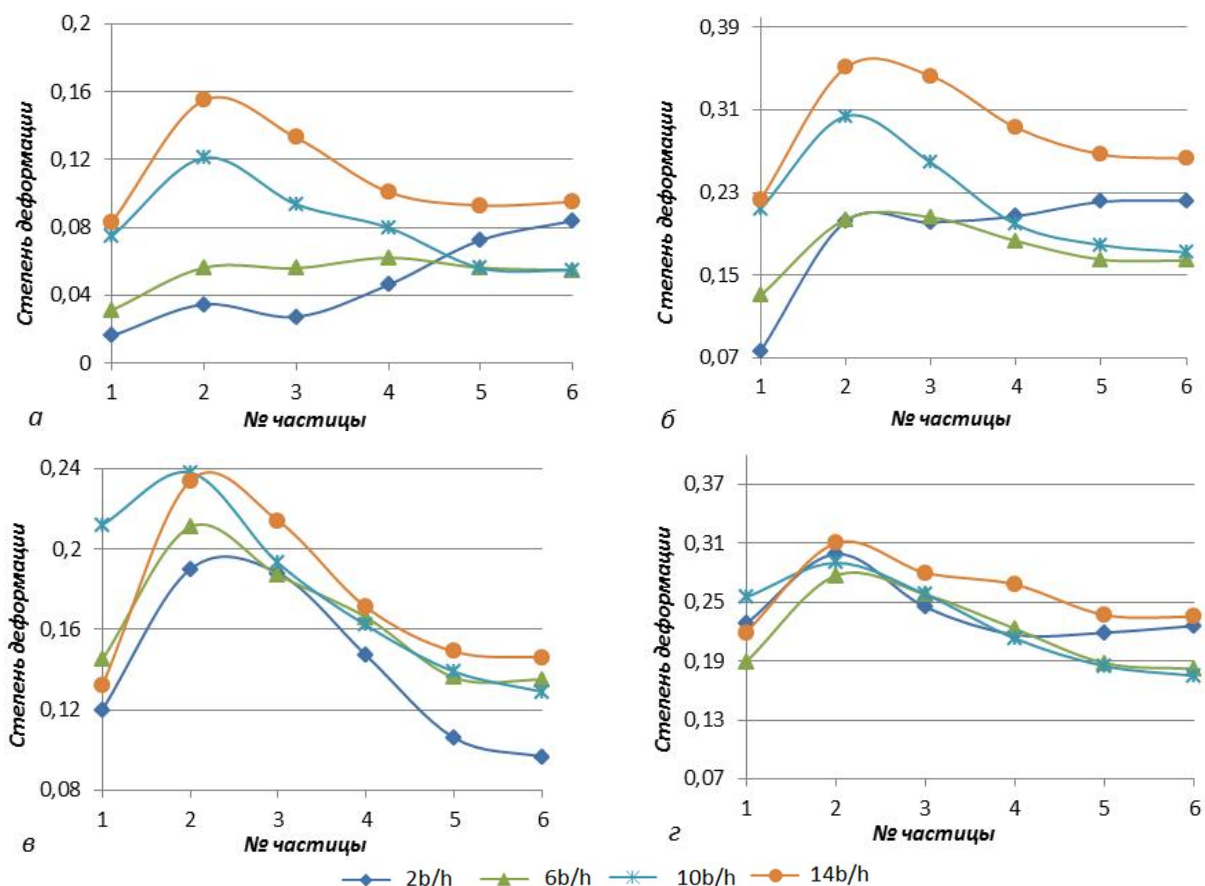


Рис. 5. Распределение степени деформации  $\epsilon_{ui}$  после первого (а) и второго этапов (б) деформации в сечении I-I и после первого (в) и второго этапов (г) деформации в сечении II-II

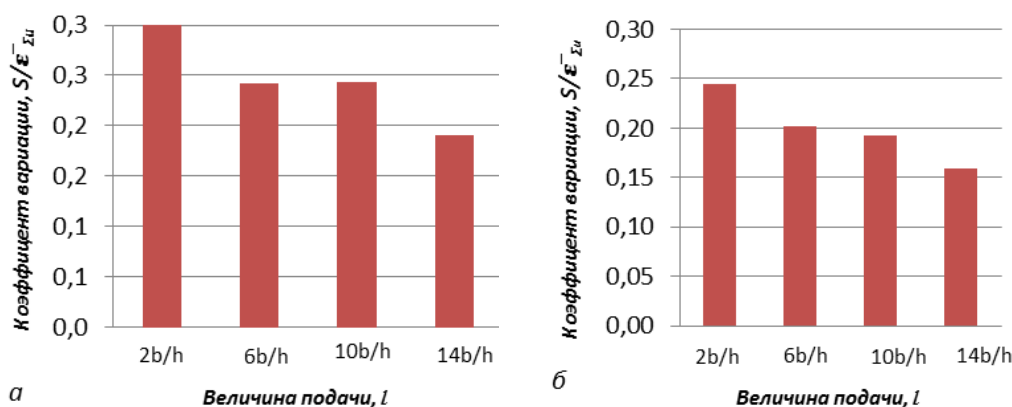


Рис. 6. Коэффициенты вариации  $S/\overline{\epsilon_{\Sigma u}}$  в зависимости от величины подачи после протяжки слитка в два этапа в сечениях I-I (а) и II-II (б)

По графикам на рис. 5 можно отметить, что удовлетворительное проникновение деформации в осевую зону заготовки обеспечивается при обжатии  $\Delta h/h = 0,1$  и величине подачи  $l = \frac{10b}{h}$  и  $l = \frac{14b}{h}$ . Расчет  $S/\overline{\varepsilon_{\Sigma u}}$  показал, что лучшие значения показателя однородности деформации по высоте заготовки достигают при подаче  $= \frac{14b}{h}$ : для сечения I-I  $S/\overline{\varepsilon_{\Sigma u}} = 0,24$ ; а для сечения II-II  $S/\overline{\varepsilon_{\Sigma u}} = 0,16$ .

### Выводы

В результате анализа формоизменения и деформированного состояния металла в предложенном способековки даны рекомендации по форме и размерам инструмента деформации из условия полного заполнения металла углублений штампа, а также обеспечения однородности деформации по всему объему литой заготовки. Установлено, что для достижения однородной деформационной проработки в очаге деформации рациональными являются относительное обжатие  $\Delta h/h = 0,1$ , а величина подачи  $l = \frac{14b}{h}$ . При кузнечной протяжке по новому способу обеспечивается знакопеременная деформация с равномерной проработкой литой структуры во всем объеме поковки при незначительном изменении размеров исходной заготовки.

### Список литературы

1. Заявка 2014135430 Российская Федерация, МПК В21J 13/02. Кузнечный инструмент / Богатов А.А., Нухов Д.Ш. № 2014135430; заявл. 29.08.2014.
2. Пластическая обработка металлов простым сдвигом / Сегал В.М., Резников В.И., Дробышевский А.Е., Копылов В.И. // Известия АН СССР. Металлы. 1981. №1. С. 115–123.
3. Процессы пластического структурообразования / Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др. Минск: Наука и техника, 1994. 232 с.
4. Park C.Y., Yang D.Y. A study of void crushing in large forgings II. Estimation of bonding efficiency by finite-element analysis // Journal of Materials Processing Technology. 1997. Vol. 72. P. 32–41.
5. Комбинированные бойки: а.с. 774756 СССР, МКИ В 21 J 13/22 / А.В. Котелкин, В.А. Петров (СССР). № 2715513; заявл. 23.01.79; опубл. 30.10.80, Бюл. № 40.
6. Кузнечный инструмент: а.с. 442878 СССР, МКИ В 21 J 13/02 / Я.М. Охрименко, В.А. Тюрин, С.Д. Баранов (СССР). № 1623639; заявл. 01.07.71; опубл. 15.09.74, Бюл. № 34.
7. Тюрин В.А. Инновационные технологииковки // Кузнечно-штамповочное производство. 2006. №5. С. 27–29.
8. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металла: учеб. пособие. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002. 328 с.
9. Панов Е.И., Эскин Г.И. Влияние поперечно-винтовой прокатки на структуру и свойства заэвтектических силуминов // Металловедение и термическая обработка металлов. МИТОМ. 2004. №9. С. 7–13.
10. Овчинников Д.В., Богатов А.А., Ерпалов М.В. Разработка и внедрение технологии производства высококачественных насосно-компрессорных труб из непрерывно-литой заготовки // Черные металлы. 2012, март. С. 18–21.
11. Валиев Р.З. Создание наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивные пластические деформации // Российские нанотехнологии. 2006. Т. 1–2. С. 208.
12. Богатов А.А., Нухов Д.Ш. Разработка рациональных режимов нового процесса кузнечной протяжки полос с применением компьютерного моделирования // Производство проката. 2015. №3. С. 3–8.
13. Богатов А.А., Нухов Д.Ш. Научные основы повышения эффективности процессаковки при знакопеременной деформации // Заготовительное производство в машиностроении. 2015. №3. С. 12–17.

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

## DEVELOPMENT OF A METHOD OF BLACKSMITH STRETCHING WITHOUT CHANGING THE SHAPE AND DIMENSIONS OF THE BILLET

**Bogatov Alexander Alexandrovich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. Phone: +7(343)375-4437. E-mail: omd@urfu.ru.

**Nukhov Danis Shamilyevich** – Research Assistant, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. Phone: +7(950)198-9646. E-mail: danis\_nuchov@mail.ru.

**Abstract.** The article deals with alternating deformation during cast-ingots stretching without changing original shape and sizes. The method involves usage of forging dies [1] with two faces which are smooth and profiled. The authors have determined rational engraving of the profiled die face and reduction conditions which provide high uniform deformation throughout the workpiece volume following the stretching.

**Keywords:** Cast structure; alternating deformation; degree of dispersion; math modeling; stress-strain states;

stressed state parameters; the degree of shear strain; ingot stretching; stamp; reduction of a workpiece.

### References

1. Bogatov A.A., Nukhov D.Sh. *Kuznechnyj instrument* [Blacksmith tool]. Application no. 2014135430 RF.
2. Segal V.M., Reznikov V. I., Drobyshevski A. E., Kopylov V. I. Direct-shear plastic metal working. *Izvestija AN SSSR. Metallurgy* [Izvestia of the USSR Academy of Sciences. Metallurgy]. 1981, no. 1, pp. 115-123.



3. Segal V.M., Reznikov V.I., Kopylov V.I. and others. *Processy plasticheskogo strukturoobrazovaniya* [Plastic structuring processes]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1994, 232 p.
4. Park C.Y., Yang D.Y. A study of void crushing in large forgings II. Estimation of bonding efficiency by finite-element analysis. *Zhurnal Tekhnologii Obrabotki materialov* [Journal of Materials Processing Technology]. 1997, no. 72, pp. 32–41.
5. Kotelkin A.V., Petrov V.A. *Kombinirovannyj bojki* [Combined]. A.S. 774756 USSR.
6. Okhrimenko Ja.M., Tyurin V.A., Baranov S.D. *Kuznechnyj instrument* [Blacksmith tool]. A.S. 442878 USSR.
7. Tyurin V.A. Innovative blacksmith technologies. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo* [Die forging]. 2006, no. 5. pp. 27–29.
8. Bogatov A.A. *Mehaniicheskie svoystva i modeli razrusheniya metalla. Uchebnoe posobie* [Mechanical properties and models of metal failure. Academic aid]. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2002, 328 p.
9. Panov E.I., Jeskin G.I. Influence of tranverse screw rolling on the structure and properties of hypereutectic aluminium-silicon alloys. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov* [Metal Science and thermal metal processing]. 2004, no. 9, pp. 7–13.
10. Ovchinnikov D.V., Bogatov A.A., Erpalov M.V. Development and implementation of production technology of tubings from cast sections. *Chernye metally* [Ferrous Metals]. 2012, march, pp.18–21.
11. Valiev R.Z. Manufacturing of unique nanostructured metals and alloys through severe plastic deformations. *Rossijskie nanotehnologii* [Russian nanotechnologies]. 2006, vol. 1-2, 208 p.
12. Bogatov A.A., Nukhov D.Sh. Rational computer-simulated conditions of a new blacksmith strip stretching process. *Proizvodstvo prokata* [Rolling production]. 2015, no. 3, pp. 3–8.
13. Bogatov A.A., Nukhov D.Sh. Scientific bases for improving efficiency of forging process under alternating deformation. *Zagotovitel'noe proizvodstvo v mashinostroenii* [Production of blanks in mechanical engineering]. 2015, no. 3, pp. 12–17.

Богатов А.А., Нухов Д.Ш. Разработка способа кузнечной протяжки без изменения формы и размеров исходной заготовки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 16–21.

Bogatov A.A., Nukhov D.Sh. Development of a method of blacksmith stretching without changing the shape and dimensions of the billet. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 16–21.

УДК 65.011.56: 621.771: 621.778: 669.21/23.018

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ КАТОДНЫХ СТЕРЖНЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ\*

Довженко Н.Н.<sup>1</sup>, Сидельников С.Б.<sup>1</sup>, Архипов Г.В.<sup>2</sup>, Константинов И.Л.<sup>1</sup>,  
Довженко И.Н.<sup>1</sup>, Лопатина Е.С.<sup>1</sup>, Ворошилов Д.С.<sup>1</sup>, Феськов Е.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>2</sup> РУСАЛ ИТЦ, Красноярск, Россия

**Аннотация.** В статье приведены результаты исследований по разработке технологий получения заготовок для катодных стержней электролизера из стали марки Ст3, плакированного с одной стороны медью марки М1. Показано, что для их получения необходимо комплексное применение методов обработки металлов давлением и диффузионной сварки в различном их сочетании. Представлены результаты моделирования процесса горячей прокатки сталемедной заготовки и определены параметры деформационного режима ее обжатия.

**Ключевые слова:** сталь, медь, технологические процессы, моделирование, диффузионная сварка, прокатка, структура.

### Введение

В рамках реализации федеральной целевой программы «Исследование и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» выполнены исследования по теме «Разработка технологии получения алюминия со снижением расхода электроэнергии на действу-

ющих электролизерах на 300–1000 кВт·ч/т алюминия» по соглашению № 14.579.21.0032 о предоставлении субсидии.

Целью проведенных работ явилось опробование технологии получения биметалла сталь-медь в лаборатории кафедры обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения СФУ.

При этом решались следующие задачи:

- выбрать последовательность технологических операций для получения сталемедных композиций с использованием операций обработки давлением и диффузионной сварки;

- выполнить моделирование процесса прокатки и установить параметры деформационного режима обжатия заготовки;

- провести опробование режимов создания ста-

\* Статья по материалам доклада на международной молодежной научно-технической конференции «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства», состоявшейся 15–17 июня 2015 г. в ФГБОУ ВПО «МГТУ» (г. Магнитогорск) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ №15-38-10185).

© Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Архипов Г.В., Константинов И.Л., Довженко И.Н., Лопатина Е.С., Ворошилов Д.С., Феськов Е.В., 2015

лемедных композиций, полученных на модельных образцах и заготовках промышленных размеров;

- исследовать структуру и свойства плакированных сталемедных заготовок;

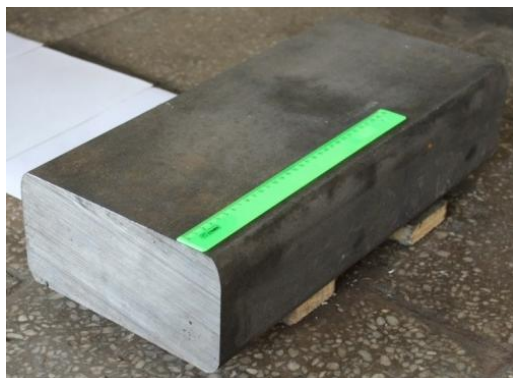
- выполнить анализ результатов проведенных лабораторных исследований и, в случае необходимости, корректировку режимов получения биметалла с учетом масштабного фактора;

- разработать рекомендации для промышленной технологии получения сталемедной композиции.

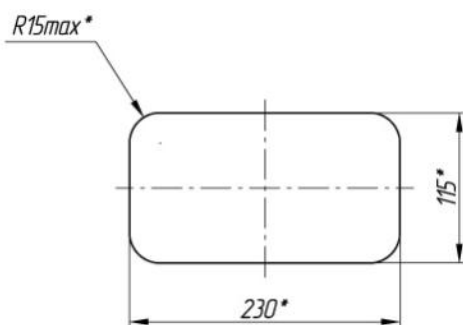
Анализ научно-технической [1–6] и патентной [7–15] литературы показал, что для решения поставленных задач целесообразно использовать методы диффузионной сварки и методы обработки металлов давлением.

### Материалы и методы исследования

В качестве материала использовали заготовки прямоугольного сечения (рис. 1) для изготовления электролизной полосы по ТУ 14-104-135-92 из стали марки Ст3 (рис. 1, а) с сечением в виде прямоугольника размерами 115×230 мм со скругленными углами радиусом 15 мм (рис. 1, б) и длиной 500 мм.



а



б

Рис. 1. Заготовка из стали марки Ст3 (а) и размеры ее поперечного сечения (б)

Заготовка для медного покрытия представляла собой пластину прямоугольного сечения с размерами в плане 190×500 мм, толщиной 16 мм из меди марки М1 (ГОСТ 1173-2006).

Оценку структуры сварного шва проводили с помощью металлографических методов исследования на световом микроскопе Axio Observer A1m фирмы Carl Zeiss.

Проведенные исследования на модельных образцах и моделирование процесса горячей прокатки дали возможность отработать технологию соединения меди и стали в масштабе 1:10 и получить параметры процесса диффузионной сварки и деформации металла. Однако переход на образцы промышленных заготовок потребовал новых исследований и уточнения параметров их обработки.

### Технические и технологические разработки

Для реализации поставленных задач использовали различные варианты получения сталемедных соединений. Модельный образец после применения операций диффузионной сварки и горячей прокатки представлен на рис. 2.



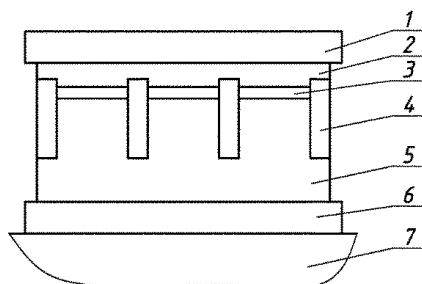
Рис. 2. Вид модельного образца

Опробование режимов изготовления биметалла, полученных на модельных образцах, проводилось на промышленных заготовках по различным вариантам.

В первую очередь выполняли предварительную обработку контактных поверхностей стальной заготовки и медной пластины путем шлифовки. После этого на столе гидравлического пресса марки ПО443 с номинальным усилием 20 МН собирался пакет, который затем подвергали сжатию, создавая усилие 10–12 МН, что соответствовало напряжению на соединяемых поверхностях равному 85–105 МПа, а для фиксации пакета в сжатом состоянии проводили сварку прокладки 2 и стальной заготовки 5 (рис. 3) с помощью 4–6 стяжных пластин 4. При этом верхнюю часть пластин приваривали к прокладке 2, а нижнюю часть – непосредственно к стальной заготовке. Таким образом, достигалось надежное и герметичное прижатие медной и стальной заготовок и последующее их фиксирование в этом состоянии. После этого аналогичную операцию производили для противоположной стороны пакета, используя для этого также четыре стяжные пластины.

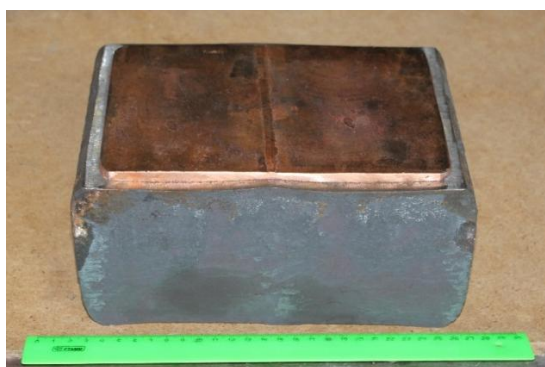
Для защиты от окисления пакет покрывали краской (водный раствор порошка мела), сушили на воздухе и загружали в печь марки СНО–3,6.2/10И с температурой нагрева 1000±10°C. Выдержка в печи составляла 120 мин, после этого

печь выключали, и охлаждение пакета проходило вместе с печью. Далее пакет разбирали и оценивали качество сварного соединения и микроструктуру полученного биметалла в зоне сварки.



**Рис. 3. Пакет для получения биметалла сталь-медь в сборе:** 1 – верхняя плита; 2 – прокладка; 3 – медь; 4 – стяжные пластины; 5 – сталь; 6 – нижняя плита; 7 – стол пресса

Другой вариант предусматривал выполнение операции протяжки нагретой медной заготовки со степенями деформации, определенными в результате моделирования процесса горячей деформации металла. Образец заготовки представлен на рис. 4.



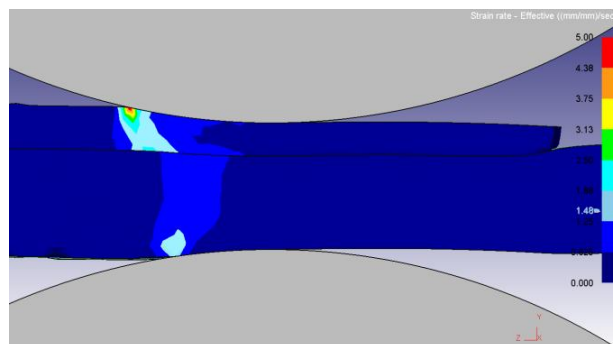
**Рис. 4. Вид стале-медной заготовки**

Данное техническое решение позволяет исключить из технологии изготовления стале-медных катодных стержней операцию горячей прокатки, однако требует больших энергосиловых затрат на деформацию металла.

**Результаты исследований и их обсуждение**

С целью получения параметров горячей обработки проведено моделирование в пакете Deform 3D™ прокатки биметалла сталь-медь на гладких валках со следующими исходными данными: диаметр валков 156 мм, длина бочки валка 220 мм; температура заготовок 1000°C, температура валков 20°C; скорость вращения валков 7 об/мин.; теплообмен заготовки с окружающей средой и прокатными валками; условия контактного взаимодействия заготовок и валков по Зи-

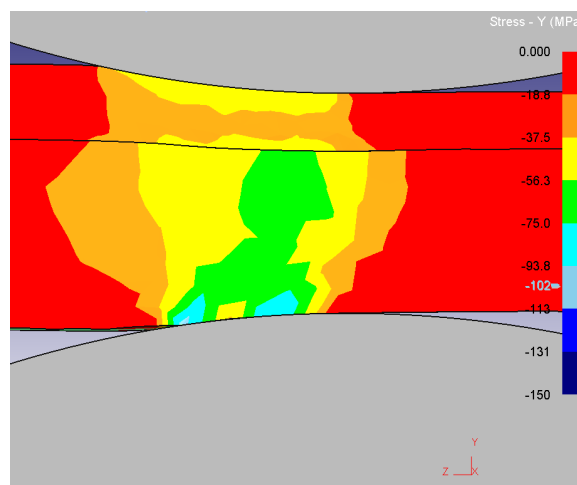
белю с показателем трения 0,5; относительное обжатие при прокатке 16,6%. Распределение скоростей деформации металла в очаге деформации показано на рис. 5.



**Рис. 5. Распределение скоростей деформации металла при прокатке**

Следует отметить, что интенсивность скоростей деформации в зоне входа в очаг деформации со стороны меди в 3,3 раза выше (максимум 5 с<sup>-1</sup>), чем со стороны стали (максимум 1,52 с<sup>-1</sup>), а также объем металла со стороны меди с повышенной скоростью деформации значителен и простирается до слоя стали.

На границе между слоями меди и стали в этой области виден скачок скорости, что говорит о создании условий сдвига между слоями и, как следствие, развитию деформации, способствующей схватыванию и сварке слоев. В этой области также имеется разрыв касательных напряжений, который виден на рис. 6. Кроме того, разрыв появляется и в зоне опережения (за нейтральным сечением ближе к выходу из очага деформации). На рис. 7 показано распределение интенсивности напряжений на границе сталь-медь, из которого также следует наличие разрыва в указанных ранее областях.



**Рис. 6. Схема напряженно-деформированного состояния по оси Y**



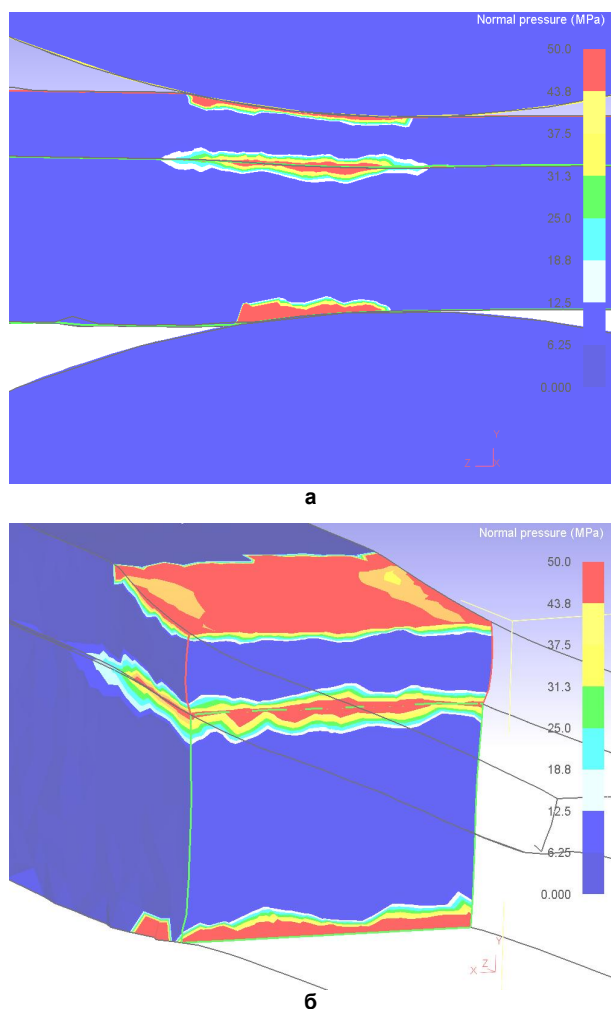


Рис. 7. Контактные напряжения на границах:  
а – вид по осям Z, Y; б – продольный разрез по осям X, Y

Программный комплекс позволяет анализировать температуру в любой точке заготовки, изделия и инструмента в любой момент времени. На рис. 8 представлены результаты моделирования распределения температуры по вертикальному сечению при прокатке.

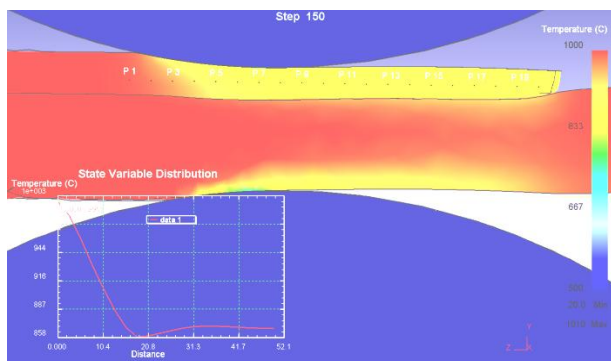
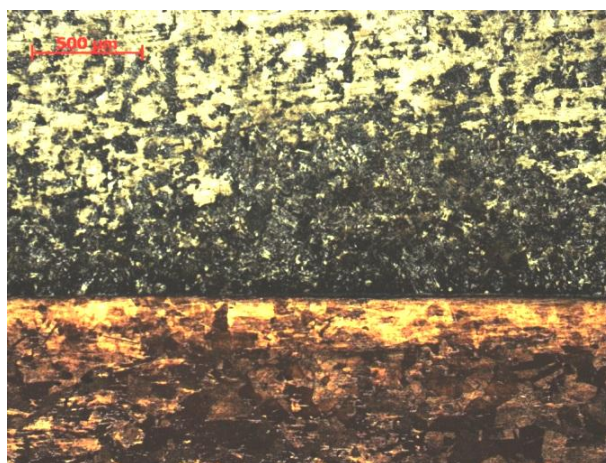


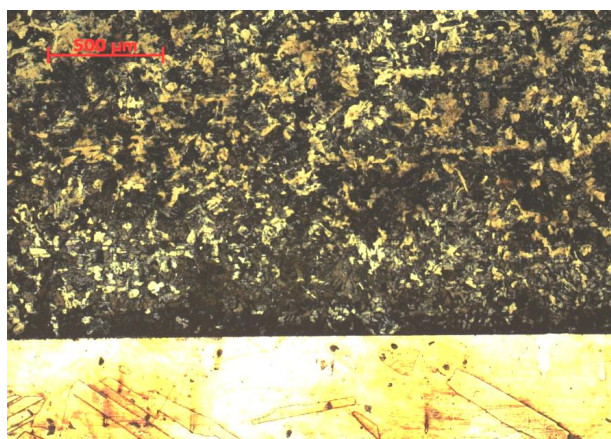
Рис. 8. Распределение температуры при прокатке

Установлено, что за счет несимметричности очага деформации и разности свойств стали и меди формируются две области: одна в зоне отставания и вторая в зоне опережения, в которых возникает разрыв скоростей деформации и касательных напряжений, обеспечивающих условия деформационной сварки стали и меди. Для обеспечения требуемой прочности соединения биметалла сталь-медь на срез необходимо, чтобы на границе сталь-медь при температуре горячей прокатки интенсивность скоростей сдвига была не ниже  $1,5 \text{ с}^{-1}$ , интенсивность касательных напряжений не ниже 75 МПа, величина нормальных напряжений не ниже 50 МПа.

Изучение микроструктуры образцов после диффузионной сварки (рис. 8, а) и горячей прокатки (рис. 8, б) показало, что опробованный режим приводит к формированию четкого и плотного сварного шва.



а



б

Рис. 9. Микроструктура сталемедной заготовки, полученной диффузионной сваркой (а) и горячей прокаткой (б): верхний слой – сталь; нижний слой – медь;  $\times 50$

Для оценки прочности сварного шва были проведены испытания образцов на срез слоев по ОСТ 5.9311-78, которые показали, что величина сопротивления срезу сварного шва образцов после диффузионной сварки составила около 50 МПа, а после прокатки увеличилась до 70 МПа.

Полученные результаты использования различных технологий получения сталемедного соединения в настоящее время используются для создания инновационной технологии, позволяющей получать катодные стержни для электролизеров длиной до 2500 мм с наименьшими затратами и гарантированным сварным соединением.

### Заключение

Таким образом, проведено моделирование горячей обработки биметаллической заготовки и установлены параметры, которые использовались для экспериментальных исследований по получению сталемедных композиций с применением операций горячей обработки давлением и диффузионной сварки. В результате получены опытные образцы биметаллических заготовок с требуемыми эксплуатационными характеристиками по прочности сварного шва.

### Список литературы

1. Баранов И. Б. Холодная сварка пластичных металлов. 3 изд. Л., 1969. 208 с.
2. Сварка. Введение в специальность: учеб. пособие / В.А. Фролов [и др.]. М.: Интермет Инжиниринг, 2004. 293 с.
3. Сварка разнородных металлов и сплавов / В.Р. Рябов, Д.М. Рабкин, Р.С. Курочко, Л.Г. Стрижевская. М.: Машиностроение, 1984. 239 с.
4. Получение методом горячей прокатки в вакууме слоистых и композиционных материалов типа медь-сталь и исследование их свойств / Ильченко Н.И., Диденко С.Ю., Неклюдов И.М., Бондаренко С.Л. // Вопросы атомной науки и техники. 2003. №3. С. 158–160.
5. Гарбуз Н.А. Исследование диффузии и механической прочности биметаллов сталь-медь // Труды Иркутского горно-металлургического института. Вып. 8. Иркутск, 1956.
6. Голованенко С.А., Устименко В.А., Меандров Л.В. Производство биметаллов. М.: Metallurgy, 1966. 153 с.
7. Пат. 1145562 Российская Федерация, МПК6 В23К20/00. Способ сварки давлением / Н.В. Гузев, А.П. Семенов, С.П. Кочармин; заявитель и патентообладатель АООТ «Научно-исследовательский технологический институт». № 3439365/27; заявл. 18.05.1982; опубл. 20.12.1996.
8. Пат. 1178014 Российская Федерация, МПК6 В23К20/00 В23К20/14. Способ изготовления диффузионной сваркой преимущественно слоистых конструкций / М.Б. Николов, В.Н. Родионов; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательский институт автоматизированных средств производства и контроля. № 3705345/27; заявл. 01.03.1984; опубл. 27.06.1995.
9. Пат. 1543733 Российская Федерация, МПК6 В23К20/00. Способ изготовления плакированных металлических материалов / Н.К. Чернов, М.Т. Казанцева; заявитель и патентообладатель НИИ Материалов электронной техники. № 4249443/27; заявл. 26.05.1987; опубл. 20.02.1995.
10. Пат. 2010689 Российская Федерация, МПК6 В23К20/00. Способ сварки давлением / В.С. Федянин; заявитель и патентообладатель Федянин Владимир Сергеевич. № 4925800/27; заявл. 04.04.1991; опубл. 15.04.1994.
11. Пат. 2025237 Российская Федерация, МПК6 В23К20/00. Способ плакирования двуслойного биметалла / Е.Н. Никитенко, Е.В. Байков, А.Г. Маншилин, А.В. Лабецкий, А.В. Завертяев, Л.Н. Дмитров; заявитель и патентообладатель Нытвинский машиностроительный институт (RU). № 5003168/27; заявл. 01.07.1991; опубл. 30.12.1994.
12. Пат. 2056960 Российская Федерация, МПК6 В21С23/22. Способ изготовления слоистых изделий / И.В. Ситников; заявитель и патентообладатель ТОО Научно-производственная фирма «Бинар». № 93010057/08; заявл. 26.02.1993; опубл. 27.03.1996.
13. Пат. 2082575 Российская Федерация, МПК6 В23К20/00, В23К20/04. Способ получения плоских биметаллических материалов / Н.Д. Лукашкин; А.П. Борисов, Л.С. Кохан; заявитель и патентообладатель Московский вечерний металлургический институт. № 24044816/02; заявл. 21.12.1994; опубл. 27.06.1997.
14. Пат. 2099166 Российская Федерация, МПК6 В23К20/00 В21С23/22. Способ изготовления биметаллической проволоки / Ю.А. Щербо, И.В. Ситников, Г.А. Поляков, А.В. Андреев, Ю.Б. Андреева, О.Г. Казаринов; заявитель и патентообладатель Промисинг Фьюче Корпорэйшн (US). № 96121187/02; заявл. 08.10.1996; опубл. 20.12.1997.
15. Пат. 2274528 Российская Федерация, МПК В23К20/04 В32В15/01 В32В15/18. Способ изготовления пакетов для производства крупногабаритных плакированных листов / В.А. Дурынин, Т.И. Титова, Э.С. Каган, И.Ф. Семернина, А.А. Сорокин, С.А. Бочаров, А.Б. Родичев, М.А. Салтыкова; заявитель и патентообладатель ООО «ОМЗ-Спецсталь». № 2004114058/02; заявл. 06.05.2004; опубл. 20.04.2006.

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

## INNOVATIVE TECHNOLOGY OF OBTAINING CATHODE RODS FOR ELECTROLYZERS

**Dovzhenko Nikolay Nikolaevich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: (8391) 293-78-46. E-mail: n.dovzhenko@bk.ru.

**Sidelnikov Sergey Borisovich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: (8391) 206-37-31. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

**Arkhipov Gennadiy Viktorovich** – Project Director of «RUSAL ETC» Ltd., Krasnoyarsk, Russia. Phone: (8391) 206-37-31. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

**Konstantinov Igor Lazarevich** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: (8391) 206-37-31. E-mail: ilcon@mail.ru.

**Dovzhenko Ivan Nikolaevich** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: (8391) 206-37-31. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

**Lopatina Ekaterina Sergeevna** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: (8391) 206-36-75. E-mail: eslopatina@mail.ru.

**Voroshilov Denis Sergeevich** – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: (8391) 206-37-31. E-mail: sibdrug@mail.ru.

**Feskov Evgeniy Valeryevich** – Postgraduate Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: (8391) 206-37-31. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

**Abstract.** This article presents the results of a research on development of technologies aimed at obtaining billets for cathode electrolyzer rods from St3 steel clad with M1 copper on one side. It is shown that an integrated application of metal forming and diffusion welding ensures obtainment of these products. This article presents modeling results of hot steel-copper billet rolling and defines parameters of deformation conditions of billet reduction.

**Keywords:** Steel, copper, technological processes, modeling, diffusion welding, rolling, structure.

#### References

1. Baranov I.B. *Kholodnaya svarka plastichnykh metallov* [Cold welding of ductile metals, 3 ed.]. Leningrad, 1969. 208 p.
2. Frolov V.A. [and others]. *Svarka. Vvedenie v spetsial'nost': uchebnoe posobie* [Welding. Introduction to Specialty: study guide]. Moscow: Intermet Engineering, 2004. 293 p.
3. Ryabov V.R., Rabkin D.M., Kurochko R.S., Strizhevskaya L.G. *Svarka raznorodnykh metallov i splavov* [Welding dissimilar metals and alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 239 p.
4. Ilchenko N.I., Didenko S.Yu., Neklyudov I.M., Bondarenko S.L. Receive with hot rolling in vacuum layered and composite materials such as copper-steel, and the study of their properties. *Voprosy atomnoj nauki i tekhniki* [Problems of Atomic Science and Technology]. 2003, no. 3, pp. 158-160.
5. Garbuz N.A. Investigation of the diffusion and mechanical strength of steel-copper bimetals. *Trudy Irkutskogo gornometallurgicheskogo instituta. Vypusk 8* [Proceedings of the Irkutsk Mining and Metallurgical Institute, issue 8]. Irkutsk, 1956.
6. Golovanenko S.A., Ustimenko V.A., Meandrov L.V. *Proizvodstvo bimetallov* [Production of bimetals]. Moscow: Metallurgy, 1966. 153 p.
7. Guzev N.V., Semenov A.P., Kocharmin S.P. *Sposob svarki davleniem* [A method of pressure welding]. Patent no. 1145562 RF.
8. Nigolov M.B., Rodionov V.N. *Sposob izgotovleniya diffuzionnoj svarkoj preimushhestvenno sloistykh konstruksij* [A method of manufacturing a diffusion welding advantageously stratified construction]. Patent no. 1178014 RF.
9. Chernov N.K., Kazantseva M.T. *Sposob izgotovleniya plakirovannykh metallicheskih materialov* [A method of manufacturing clad metal materials]. Patent no. 1543733 RF.
10. Fedyanin V.S. *Sposob svarki davleniem* [A method of pressure welding]. Patent no. 2010689 RF.
11. Nikitenko E.N., Baykov E.V., Manshilin A.G., Labetskiy A.V., Zaver'yaev A.V., Dmitrov L.N. *Sposob plakirovaniya dvuslojnogo bimetallo* [A method of clad two-layer bimetal]. Patent no. 2025237 RF.
12. Sitnikov I.V. *Sposob izgotovleniya sloistykh izdelij* [A method of manufacturing layered products]. Patent no. 2056960 RF.
13. Lukashkin N.D., Borisov A.P., Kokhan L.S. *Sposob polucheniya ploskikh bimetallicheskih materialov* [A method for producing of flat bimetallic material]. Patent no. 2082575 RF.
14. Shcherbo Y.A., Sitnikov I.V., Polyakov G.A., Andreev A.V., Andreeva Y.B., Kazarinov O.G. *Sposob izgotovleniya bimetallicheskoj provoloki* [A method of manufacturing a bimetallic wire]. Patent no. 2099166 RF.
15. Durynin V.A., Titova T.I., Kagan E.S., Semernina I.F., Sorokin A.A., Bocharov S.A., Rodichev A.B., Saltykova M.A. *Sposob izgotovleniya paketov dlya proizvodstva krupnogabaritnykh plakirovannykh listov* [A method of manufacturing a package for the production of large-sized clad sheets]. Patent no. 2274528 RF.

Инновационные технологии получения катодных стержней для электролизеров / Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Архипов Г.В., Константинов И.Л., Довженко И.Н., Лопатина Е.С., Ворошилов Д.С., Феськов Е.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 21–26.

Dovzhenko N.N., Sidelnikov S.B., Arkhipov G.V., Konstantinov I.L., Dovzhenko I.N., Lopatina E.S., Voroshilov D.S., Feskov E.V. Innovative technology of obtaining cathode rods for electrolyzers. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 21–26.



УДК 621.774.38

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ НОВОГО ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО СПЛАВА И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ ТРУБ ИЗ НЕГО\*

Фокин Н.В.<sup>1</sup>, Космацкий Я.И.<sup>1</sup>, Денисюк С.А.<sup>2</sup><sup>1</sup> РосНИТИ, Челябинск, Россия<sup>2</sup> Волжский трубный завод, Волжский, Россия

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследования деформационной способности нового высоколегированного сплава на хромоникелевой основе и определена возможность его применения для производства горячепрессованных труб. Разработаны технологические режимы горячего прессования труб различного сортамента на основе результатов пластометрических исследований. Проведено опытно-промышленное прессование труб из нового хромоникелевого сплава, анализ результатов которого позволил определить недостатки разработанной технологии и действия по их устранению.

**Ключевые слова:** горячее прессование труб, технология прессования, деформационная способность, высоколегированные сплавы на хромоникелевой основе, опытно-промышленная партия труб.

### Введение

В настоящее время поставка нарезных труб из хромоникелевого сплава марки SM 2535 и его аналогов в адрес ОАО «Газпром» осуществляется исключительно иностранным производителем. В современных экономических условиях появилась возможность увеличения объемов выпуска продукции по схеме импортозамещения в соответствии с приказом Минпромторга РФ [1]. Это позволило, в свою очередь, инициировать разработку новой технологии и продвижение собственного конкурентоспособного продукта из высоко коррозионностойкого сплава на хромоникелевой основе марки ТМК-С, разработанного в начале XXI в. специалистами ОАО «РосНИТИ» и ОАО «СинТЗ» [2].

### Материалы и методы исследования

Особенностью сплава ТМК-С, заявленный химический состав которого должен соответствовать данным табл. 1, является то, что суммарное содержание молибдена и вольфрама составляет не более 6 мас.%, ванадия и ниобия – не более 0,2 мас.%, а соотношение никеля (мас.%) определяется

$$1,10 < \frac{\% \text{Ni}}{\% \text{Cr} + 0,8 \cdot (\% \text{Mo} + \% \text{W})} < 1,25.$$

\* Статья по материалам доклада на международной молодежной научно-технической конференции «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства», состоявшейся 15–17 июня 2015 г. в ФГБОУ ВПО «МГТУ» (г. Магнитогорск) при финансовой поддержке Росийского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ №15-38-10185).

© Фокин Н.В., Космацкий Я.И., Денисюк С.А., 2015

Кроме того, техническим решением [2] оговорены режимы термической обработки и деформации сплава. Заявленные признаки обеспечивают более высокую вязкость и пластичность стали в состоянии после холодной деформации, а также ее повышенные технологические и антикоррозионные свойства по сравнению с известными аналогами.

Для исследования деформационной способности сплава пластометрические исследования проводились на многофункциональном исследовательском комплексе «Gleeble 3800» ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ) с использованием сменного модуля ударного нагружения «Hydrawedge» [3].

Для прессования планировалось использовать заготовку двух типов: диаметром сечения в диапазоне от 302,1 до 302,5 мм и диаметром в диапазоне от 188,2 до 188,6 мм. Поскольку оба типа заготовки были получены от одной плавки и для изготовления заготовки использовался слиток одного размера, величина укова была различной. Для заготовки диаметром 302 мм коэффициент укова составлял 2,3, а для заготовки 188 мм – 6,0. Вид заготовок-штанг из сплава марки ТМК-С представлен на рис. 1.

От поперечных темплетов исходной заготовки обоих размеров в продольном и поперечном сечениях вырезали планки. Затем из планок изготавливали стандартные цилиндрические образцы диаметром 10,0 мм и длиной 15,0 мм.

Температура горячей деформации сплава ТМК-С в обоих вариантах планируемой технологии прессования находится в диапазоне от 1130 до 1160°C, поэтому при проведении исследований температуру устанавливали равной 1150°C. Скорость деформации в зависимости от

варианта технологии находится в диапазоне от 6,8 до 11,4 с<sup>-1</sup>, поэтому при проведении исследований скорость деформации устанавливали равной 10,0 с<sup>-1</sup>. Степень деформации в зависимости от варианта технологии находится в диапазоне от 1,90 до 1,98. Однако технологические возможности комплекса «Gleeble 3800» не обеспечивают получение данной величины степени деформации, поэтому при проведении исследований степень деформации устанавли-

вали максимальной –  $\epsilon = 1,3$ .

Образцы после деформации в обоих случаях имели ровную округлую форму, что свидетельствовало о равномерном течении металла в радиальном направлении.

Кривые течения металла в интервале истинных деформаций от 0 до 1,3 для образцов, изготовленных из трубной заготовки диаметром 302 мм, показаны на рис. 2, а образцов, изготовленных из трубной заготовки диаметром 188 мм, – на рис. 3.

Таблица 1

Химический состав сплава ТМК-С

Массовая доля элементов, %													Cu	Cr	Ni	Mo	Fe
не более																	
C	Si	Mn	S	P	Ti	Nb	W	V	Al	N	PЗМ						
0,05	0,2	2,5	0,01	0,02	0,2	0,1	3,0	0,15	0,1	0,11	0,05	1,0–3,0	24,0–28,0	25,0–40,0	2,5–5,0	Ост.	



Рис. 1. Заготовки-штанги из сплава марки ТМК-С плавка № 49716 производства Aceralava (сертификат качества № 617178 и 617177)

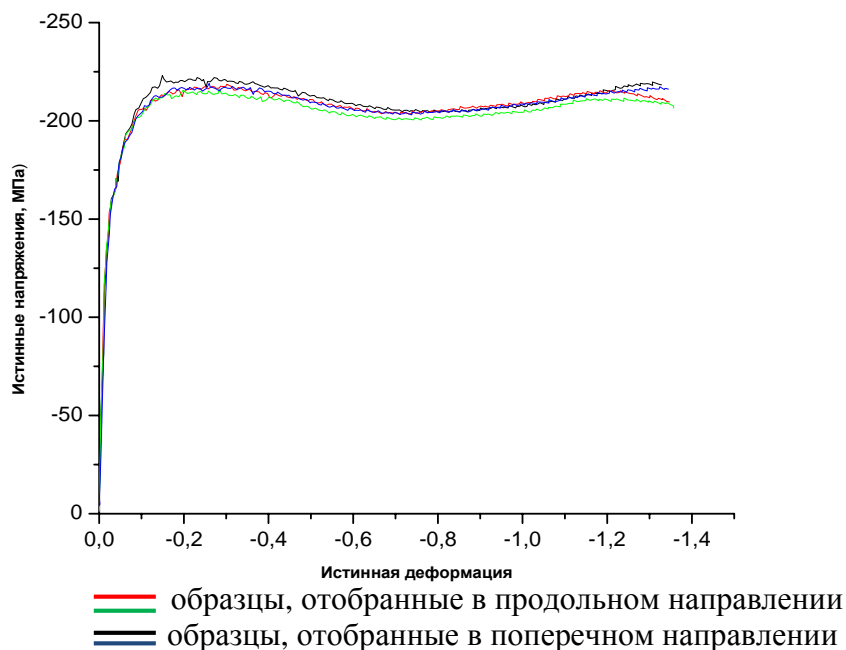
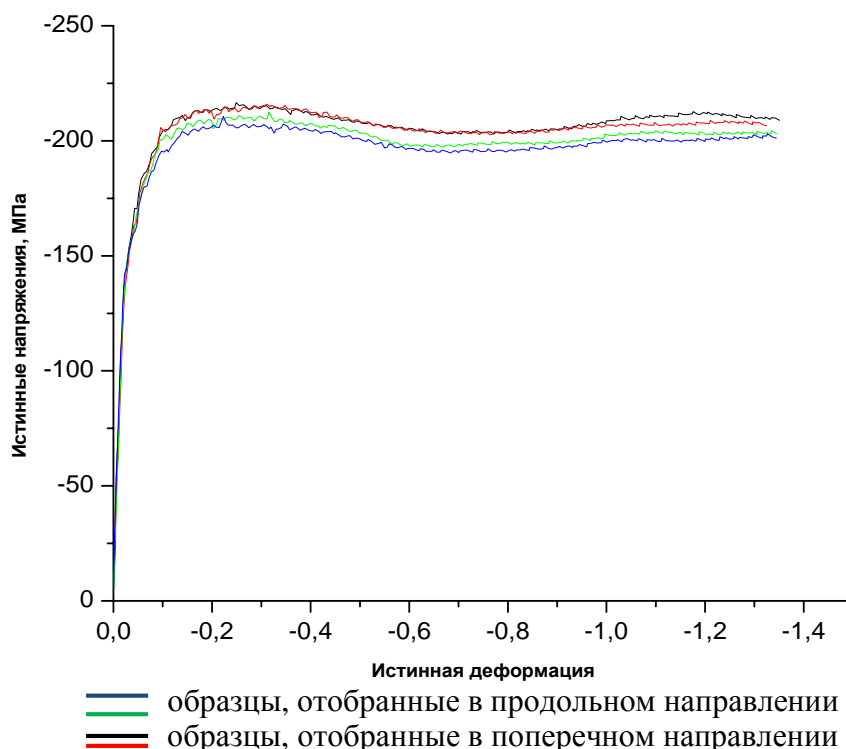


Рис. 2. Кривые течения в интервале деформаций от 0 до 1,3 (заготовка диаметром 302 мм, температура 1150 °С, скорость деформации 10 с<sup>-1</sup>)



**Рис. 3.** Кривые течения в интервале деформаций от 0 до 1,3 (заготовка диаметром 188 мм, температура 1150 °С, скорость деформации 10 с<sup>-1</sup>)

Кривые представлены в том виде, как их выдает программа обработки экспериментальных данных «Origin.pro 8.5.1». Знак «-» перед значениями относительной деформации и напряжения говорит о направлении деформации – деформация сжатия.

Анализ полученных данных свидетельствовал о сходном характере изменения величины сопротивления металла пластической деформации (на графиках – истинное напряжение) для трубной заготовки различного диаметра, изготовленной из сплава ТМК-С. В обоих случаях максимальная величина сопротивления металла пластической деформации наблюдалась в диапазоне степени деформации от 0,18 до 0,25.

В указанном диапазоне сопротивление деформации, зарегистрированное как на продольных, так и на поперечных образцах сплава ТМК-С, достигает максимальных значений:

- на образцах с величиной укова 2,3 (заготовка диаметром 302 мм, см. **рис. 2**) – 220 МПа;
- на образцах с величиной укова 6,0 (заготовка диаметром 188 мм, см. **рис. 3**) – 215 МПа.

При максимальной в эксперименте степени деформации ( $\epsilon = 1,3$ ) величина сопротивления деформации сплава ТМК-С на всех образцах с величиной укова 6,0 (заготовка диаметром 188 мм) несколько уменьшается и достигает значений 205–210 МПа. При этом заметной динамики

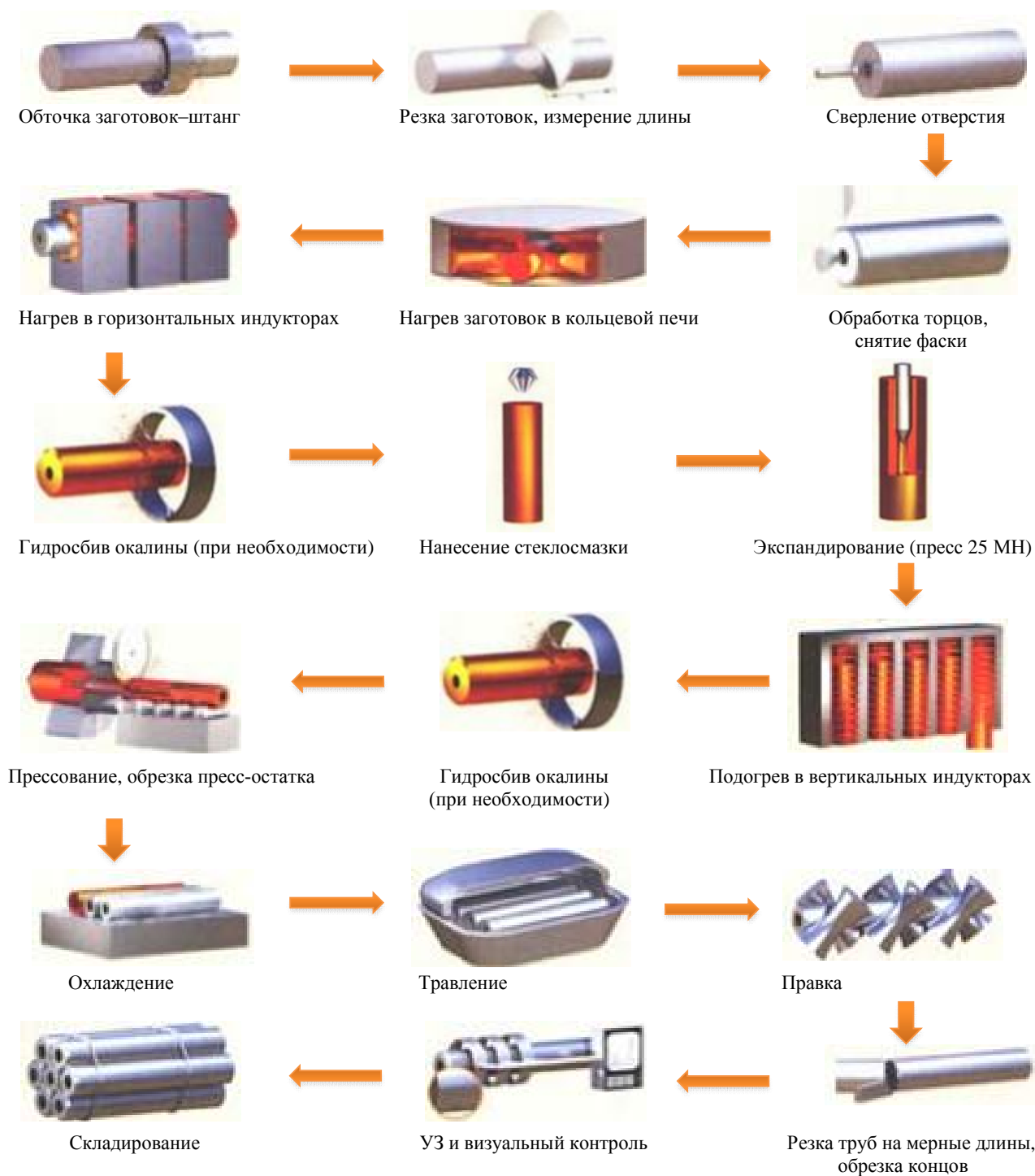
изменения сопротивления не наблюдается, что говорит о равномерных свойствах деформируемого зерна металла во взаимно перпендикулярных направлениях.

При максимальной в эксперименте степени деформации ( $\epsilon = 1,3$ ) образцов с меньшей величиной укова 2,3 наблюдается другая картина. При степени деформации  $\epsilon = 1,2$  заметно расхождение ветвей графиков, соответствующих поперечным и продольным образцам, причем образцам, отобранным в поперечном направлении, соответствуют большие значения сопротивления деформации (на графиках – истинное напряжение), а образцам, отобранным в продольном направлении, – меньшие.

Полученный результат полностью согласуется с проведенными ранее исследованиями деформации образцов центробежно-литой заготовки стали марки 08X18H10T [4], в результате которых был сделан вывод о существенной асимметрии величины сопротивления деформации металла в двух взаимно перпендикулярных направлениях относительно оси трубной заготовки.

Технологическая схема изготовления горячепрессованных передельных труб из сплава марки ТМК-С в условиях трубопрессового цеха № 2 ОАО «ВТЗ» на прессовой линии 55 МН представлена на **рис. 4**.





**Рис. 4. Технологическая схема изготовления передельных труб из хромоникелевого сплава ТМК-С в условиях ОАО «ВТЗ»**

Технологическая схема изготовления на прессовой линии 20 МН отличается отсутствием операции нагрева заготовок в кольцевой печи. Гидросбив окалины для сплава ТМК-С не применялся ввиду отсутствия интенсивного окиснообразования сплава при нагреве до интервала температур прессования.

За период производства были освоены опытно-промышленные партии труб, размеры и технологические параметры которых представлены в **табл. 2**. В таблице также отражены расчетные значения технологических параметров для качественной оценки сходимости результатов расчета и фактических технологических режимов производства.

Таблица 2

## Фактические и расчетные технологические параметры изготовления опытно-промышленных партий труб из сплава марки ТМК-С

Размеры труб, мм	Ø108,0×9,5	Ø108,0×11,5	Ø146,0×30,0	Ø168,0×8,0	Ø168,0×27,0
Кол-во труб	27	44	6	10	6
Масса, т.	3,708	6,054	2,93	2,316	3,14
РКМ	–	1,0619	1,2031	–	–
Диаметр заготовки, мм	188		302		
Фактическое пиковое значение усилия прессования, МН	16,9–18,8	17,8–19,0	46,8–51,7	47,5–49,0	42,0–50,0
Расчетное значение пикового усилия прессования, МН	17,5–18,5		47,5–50,0		40,3–44,6

Для варианта изготовления труб сплава ТМК-С размерами 108,0×9,5 мм и 108,0×11,5 из заготовки диаметром 188 мм на прессовой линии 20 МН фактическое значение пикового усилия прессования составило 17,85 и 18,4 МН соответственно, что достаточно близко к расчетным значениям пикового усилия прессования 17,5–18,5 МН, определенным по методике работы [5]. В процессе изготовления опытно-промышленных партий труб для снижения значения пикового усилия прессования использовали пресс-иглу с коническим участком на переднем конце, что позволило избежать превышения допустимого усилия прессования и аварийной остановки прессового оборудования. Однако данная технология снижения пикового усилия значительно повышает расходный коэффициент металла за счет образования утолщенного переднего конца трубы длиной не менее 300,0 мм.

Для варианта изготовления труб сплава ТМК-С размерами 146,0×30,0 мм из заготовки диаметром 302 мм на прессовой линии 55 МН фактическое значение пикового усилия прессования определялось интервалом от 46,8 до 51,7 МН. Полученный результат достаточно хорошо коррелируется с расчетными значениями усилия прессования 47,5–49,0 МН, определенными в процессе предварительной разработки технологических режимов. Прессование также проводилось со снятием пикового усилия на большую стенку переднего конца трубы, вследствие чего получен повышенный расходный коэффициент металла.

Производство опытно-промышленной партии труб размерами 168,0×8,0 мм сопровождалось значениями пикового усилия прессования в интервале от 47,5 до 49,0 МН при расчетных значениях от 47,5 до 50,0 МН. Прессование осуществлялось со снятием пикового усилия на стенке 18,0 мм на переднем конце трубы. Прессование труб 168,0×27,0 мм проходило без снятия пикового усилия за счет проточки пресс-иглы на меньший диаметр, однако при этом фактическое значение пикового усилия прессования

в среднем превысило расчетные значения согласно табл. 2. Причиной этому может выступать неравномерный прогрев гильзы в вертикальных индукционных печах.

Трубы всех вышеуказанных опытных партий подвергались химической обработке в растворе серно-плавиковой кислоты (травлению), последующей правке в косовалковой правильной машине и зачистке дефектов наружной поверхности. На рис. 5 изображены трубы размером 146,0×30,0 мм после вышеупомянутых операций отделки труб.



Рис. 5. Трубы размером 146,0×30,0 из сплава марки ТМК-С (после обточки и зачистки)

Исходя из результатов изготовления опытно-промышленных партий труб из хромоникелевого сплава марки ТМК-С, одним из основных технологических недостатков является повышенный расходный коэффициент металла, который, в свою очередь, вызван применением технологии снижения значения пикового усилия за счет проточки переднего конца пресс-иглы. Применение данной технологии определяется повышенными значениями усилия прессования, следовательно, снижение усилия прессования является приоритетным направлением совершенствования технологии производства как данного сортамента труб, так и в целом всего сортамента труб из малопластичных сталей и сплавов.

### Заключение

В настоящее время специалистами ОАО «РосНИТИ» проводится научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа по теме: «Исследование возможностей снижения пиковых нагрузок при прессовании труб и разработка технических предложений по их реализации». Целью выполнения настоящей НИОКР является повышение эффективности технологии производства горячепрессованных труб в ТПЦ-2 ОАО «ВТЗ» за счет исследования возможностей снижения пиковых нагрузок при прессовании труб, разработки и опытно-промышленного опробования технического решения, обеспечивающего сокращение энергозатрат и изготовление труб из сложнолегированных труднодеформируемых и малопластичных марок сталей и сплавов в сортаменте цеха. При этом указанная работа предусматривает выполнение ряда мероприятий.

1. Проведение анализа существующих технических решений, направленных на снижение энергозатрат при изготовлении труб методом прессования.

2. Разработка технических предложений, обеспечивающих снижение пиковых нагрузок и оценка технологической возможности их реализации в промышленных условиях ТПЦ-2.

3. Теоретические исследования технических решений, обеспечивающих снижение пиковых нагрузок.

4. Проведение экспериментальных исследований процесса прессования труб с применением новых способов и устройств, обеспечивающих

повышение эффективности процесса за счет снижения пиковых нагрузок.

5. Разработка конструкторской документации, предназначенной для реализации принятых технических решений в условиях ТПЦ-2 ОАО «ВТЗ».

6. Опытное-промышленное опробование технологии с применением разработанного технического решения.

Реализация представленного комплексного подхода к решению задачи эффективного снижения пикового усилия прессования труб позволит обеспечить, в том числе, совершенствование технологии производства горячепрессованных труб из труднодеформируемых сплавов.

### Список литературы

1. Об утверждении плана мероприятий по импортозамещению в отрасли черной металлургии Российской Федерации: приказ № 652 от 31 марта 2015 года. М., 2015. 4 с.
2. Пат. 2254394 Российская Федерация, МПК С 22 С 38/38, С 21 D 8/00. Высокопрочная аустенитная сталь и способ окончательной упрочняющей обработки изделий из нее / Бодров Ю.В., Брижан А.И., Лефлер М.Н., Марченко Л.Г., Пумпянский Д.А., Пышминцев И.Ю. и др. № 2004107828; заявл. 16.06.04; опубл. 20.06.05, Бюл. № 5. 13 с.
3. Космацкий Я.И., Гасленко М.И., Тихонова М.А. Информационное обеспечение и управление технологическими процессами трубопрессового производства: учеб. пособие. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2013. 47 с.
4. Исследование свойств центробежно-литой трубной заготовки стали 08X18H10T / Б.В. Баричко Б.В., Я.И. Космацкий, С.В. Руциц и др. // Металлург. 2013. №4. С. 59–62.
5. Баричко Б.В., Медведев М.И., Космацкий Я.И. Сравнительный анализ двух методик определения силовых параметров прессования труб из нержавеющей сталей и сплавов // Металлург. 2010. № 4. С. 72–74.

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

#### RESEARCH ON DEFORMABILITY OF A NEW HIGH ALLOY AND DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY ENABLING TO EXTRUDE PIPES FROM THE ALLOY

**Fokin Nikolay Vladimirovich** – Laboratory Engineer of drawing and pressing, JSC «RosNITI», Chelyabinsk, Russia.

**Kosmatsky Yaroslav Igorevich** – Ph.D. (Eng.), Deputy Head of the Materials in the Department of pipe manufacturing technologies JSC «RosNITI», Chelyabinsk, Russia.

**Denysiuk Sergey Alexandrovich** – Deputy Head of the tube pressing department no. 2, JSC «Volzhsky Pipe Plant», Volzhskij, Russia.

**Abstract.** The article presents the results of a study of the deformation ability of the new high alloy chromium-nickel based on defined and the possibility of its use for the production of hot pipes. The technological modes of hot extrusion of pipes of various sizes on the basis of plastometer research. A pilot industrial extrusion pipes from a new nickel-chromium alloy, analysis of which allowed us to determine the shortcomings of the technology, and corrective actions.

**Keywords:** Hot extrusion of pipes, pressing technology, deformation capacity, high-alloy chromium-nickel-based alloys, a pilot batch of pipes.

#### References

1. Rossiyskaya Federatsiya. Ministr promyshlennosti i trgovli D.V. Manturov. Prikaz № 652 ot 31 marta 2015 goda [Tekst]: (ob utverzhdenii plana meropriyatiy po importozameshcheniyu v otrasli chernoy metallurgii Rossiyskoy Federatsii). Moscow, 2015. 4 p.
2. Bodrov Yu.V., Brizhan A.I., Lefler M.N., Marchenko L.G., Pumpyanskiy D.A., Pyshmintsev I.Yu. *Vysokoprochnaya austenitnaya stal' i sposob okonchatel'noy uprochnyayushchey obrabotki izdeliy iz nee* [A high-strength austenitic stainless steel and a method of hardening the final processing of it]. Patent RF, no. 2254394, 2004.
3. Kosmatsky Ya. I., Gaslenko M.I., Tikhonova M.A. [Information-



- noe obespechenie i upravlenie tekhnologicheskimi protsessami trubopressovogo proizvodstva: uchebnoe posobie] Information provision and control of technological processes of production tube pressing: a tutorial. Chelyabinsk: South Ural State University Publishing House, 2013. 47 p.
4. Barichko B.V., Kosmatsky Ya.I., Ruschits S.V. Investigation of the

- properties of centrifugally cast steel billets 08X18H10T. *Metallurg [Metallurgist]*. 2013, vol. 4, pp. 59-62.
5. Barichko B.V., Kosmatsky Ya.I., Medvedev M.I. Comparative analysis of two methods for determining the parameters of the pressing power tubes of stainless steels and alloys. *Metallurg [Metallurgist]*. 2010, no. 4, pp. 72-74.

Фокин Н.В., Космацкий Я.И., Денисюк С.А. Исследование деформационной способности нового высоколегированного сплава и разработка технологии горячего прессования труб из него // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 27–33.

Fokin N.V., Kosmatsky Ya.I., Denysiuk S.A. Research on deformability of a new high alloy and development of a technology enabling to extrude pipes from the alloy. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]*. 2015, no. 4, pp. 27–33.

УДК 621.77

## РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБ В КОРРОЗИОННОСТОЙКОМ ИСПОЛНЕНИИ\*

Богатов Н.А.<sup>1</sup>, Богатов А.А.<sup>2</sup>, Салихьянов Д.Р.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НПО «Трубная Энергетическая Машиностроительная Продукция», Москва, Россия

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

**Аннотация.** В настоящее время нефтедобывающей отрасли в России необходима разработка новых инновационных проектов, направленных на радикальное повышение эксплуатационных характеристик материальных ресурсов и сокращение объемов их потребления. Одним из наиболее перспективных направлений защиты от коррозии является производство и применение труб из слоистых композиционных материалов. Существует несколько основных способов их изготовления на основе процессов обработки металлов давлением. Как показывает мировая практика, для насосно-компрессорных труб рациональным способом является технология лейнирования. Лейнирование заключается в совместной раздаче труб из разнородных материалов, имеющих разные свойства. В такой трубе удастся объединить и высокую коррозионную стойкость, и механическую прочность, благодаря чему эксплуатационный ресурс повышается по сравнению с трубами традиционного исполнения более чем в 4 раза. Однако предыдущий зарубежный опыт их изготовления и применения выявил необходимость совершенствования отдельных технологических процессов производства труб. В статье рассмотрены новые технические решения в производстве лейнированных труб и результаты их испытания в эксплуатационных условиях.

**Ключевые слова:** насосно-компрессорные трубы, лейнирование, лейнированные трубы, биметаллические трубы, обработка металлов давлением, восстановление эксплуатационного ресурса.

### Введение

Россия является одним из мировых лидеров по добыче нефти. Следует отметить, что условия добычи нефти в России за последние десятилетия изменились: освоение новых месторождений смещается все в более неблагоприятные регионы с точки зрения горно-геологических и природно-климатических условий, в то время как нефтедобыча в обустроенных и открытых 30–50 лет назад регионах характеризуется высокой обводненностью скважин и интенсивным коррозион-

ным разрушением внутрискважинного оборудования. Из-за совместного воздействия таких факторов, как наличие растворенных газов H<sub>2</sub>S и CO<sub>2</sub> в добываемом флюиде, абразивный износ и растягивающие напряжения в наиболее тяжелых условиях находятся насосно-компрессорные трубы (НКТ). Это подтверждается анализом причин выхода из строя глубинно-насосного оборудования скважин, который показывает, что доля отказов по причине выхода из строя НКТ является преобладающей среди прочих и составляет порядка 60%. Опыт эксплуатации скважин, осложненных в коррозионном отношении, показывает, что срок службы НКТ в них в отдельных случаях не превышает 4 месяцев [1–7]. Эксплуатация таких скважин крайне затруднена и сопряжена со значительными расходами финансовых ресурсов на восстановление работоспособности насосно-компрессорной колонны. Затраты на восстановление работоспособности каждой

\* Статья по материалам доклада на международной молодежной научно-технической конференции «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства», состоявшейся 15–17 июня 2015 г. в ФГБОУ ВПО «МГТУ» (г. Магнитогорск) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ №15-38-10185).

© Богатов Н.А., Богатов А.А., Салихьянов Д.Р., 2015

скважины составляют около 350 тыс. руб., ежегодные аварийные отказы в эксплуатации насосно-компрессорных колонн в целом и в нефтяной промышленности исчисляются тысячами, а затраты на их устранение сотнями миллионов рублей. Отсюда следует, что одним из путей увеличения срока эксплуатации нефтяного оборудования и снижения стоимости обслуживания скважины является повышение коррозионной стойкости и эксплуатационного ресурса НКТ.

### Краткие сведения о производстве насосно-компрессорных труб в России

Для замены исчерпавших эксплуатационный ресурс НКТ трубная промышленность России ежегодно предоставляет нефтяным компаниям около 250 тыс. т новых труб. В качестве материала труб наиболее часто используются среднеуглеродистые марганцовистые стали (30Г2, 35Г2С и т. д.) и хромомолибденовые стали (30ХМА), однако они не обладают удовлетворительной коррозионной стойкостью.

Анализ научно-технической документации на изготовление НКТ [8–9] показывает, что в отечественных стандартах не предусмотрены достаточные требования по сопротивлению коррозионному разрушению, что в определенной мере сдерживает процессы совершенствования качества трубной продукции. В зарубежной практике нефтедобычи вопросам стойкости НКТ в агрессивных средах уделяется большее внимание – в условиях осложненной добычи нефти уже нашли широкое применение НКТ из разных групп нержавеющей сталей и коррозионностойких сплавов: аустенитные нержавеющие стали; ферритные нержавеющие стали, мартенситные нержавеющие стали. Ряд отечественных и зарубежных работ посвящен рациональному выбору марки стали или сплава и составлению матрицы выбора материала трубы в зависимости от конкретных условий добычи нефти, а именно от температуры и содержания компонентов  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$  в скважине [1–5, 10–12].

Производство НКТ в особо коррозионностойком исполнении в России находится на уровне производства опытных и опытно-промышленных партий, а нормативно-техническая документация на ее изготовление – на уровне технических условий для конкретного предприятия. В сложившейся ситуации нефтяные компании РФ вынуждены закупать трубную продукцию из нержавеющей сталей по импорту. В 2013 году вынужденная закупка труб из нержавеющей сталей составила 9 600 т. Цена труб в особо стойком коррозионном исполнении составляет 200–250 тыс. руб. за 1 т труб (2014 г.).

### Направления повышения долговечности насосно-компрессорных труб

Основными направлениями по решению проблемы увеличения срока службы глубинно-насосного оборудования [13], применяемыми нефтедобывающими компаниями являются: 1) ингибирование коррозии путем подачи химического реагента на прием насоса и в затрубное пространство; 2) проведение внутрискважинных обработок методом периодической закачки химического реагента; 3) применение протекторов коррозии для защиты от электрохимической коррозии (жертвенные аноды); 4) внедрение НКТ из высоколегированных сталей в антикоррозионном исполнении; 5) нанесение специальных антикоррозионных покрытий на внутреннюю поверхность НКТ. Эти мероприятия требуют дополнительных затрат. Еще одним направлением увеличения срока службы НКТ является применение технологии их ремонта, для чего созданы сервисные компании. Существующая технология ремонта заключается в очистке внутренней поверхности труб от отложений и вырезке дефектных участков, однако срок службы отремонтированных труб является сниженным из-за сохранения дефектов, коррозионных изъявов, которые интенсифицируют процессы коррозии на втором этапе эксплуатации труб.

Радикально повысить уровень эксплуатационных характеристик, надежность и срок службы труб позволяет их изготовление из слоистых композиционных металлов. В зарубежной практике такие материалы нашли применение во множестве отраслей промышленности. Получение слоистых композиционных труб возможно несколькими принципиально разными путями: продольная сварка биметаллического листа, получение труб совместной раздачей, жидкостная диффузионная сварка по поверхностям разделов, сварка взрывом, центробежное литье труб и горячее изостатическое прессование [14, 15]. В нефтегазодобывающей отрасли имеется положительный опыт испытаний партий труб из слоистых композиционных материалов в береговых и морских нефтяных скважинах. Опыт изготовления и применения лейнированных труб имеют такие предприятия, как Ltd Kawasaki Heavy Industries (Япония) при тесном сотрудничестве NAM (Нидерланды), Shell Oil (США) и Ltd Kuroki Tube & Pipe Co (Япония) [16] и в России [17, 18]. Лейнирование заключается в совместной раздаче трубы из обычной углеродистой или низколегированной стали, выступающей в качестве наружной оболочки, и тонкостенной трубы из коррозионностойкой высоколегированной стали, выступающей в качестве внутренней оболочки. При этом соединение труб обеспечивается за счет сжимающих остаточных напряжений на межслойной границе труб.

### Разработка технологии производства лейнированных насосно-компрессорных труб

Общая схема разрабатываемого технологического процесса технологии лейнирования насосно-компрессорных труб с достаточной полнотой изложена в работах [17–19]. В основе технологии лежит совместная раздача оболочек на оправке (рис. 1), что является новым подходом в получении лейнированных труб. Другой отличительной особенностью разрабатываемой технологии получения лейнированных труб является наличие герметика между оболочками, призванным исключить опасность возникновения коррозии на межслойной границе между металлами оболочек, а также повысить надежность их сцепления. Применение герметика позволяет решить многие проблемы, связанные с исходным качеством заготовок, кроме того, к его преимуществу можно отнести возможность использования даже изношенных насосно-компрессорных труб в качестве исходных заготовок. В этом случае герметик заполняет внутренние дефекты и язвы, образовавшиеся в изношенной трубе на первом этапе эксплуатации, и исключает опасность возобновления коррозионных процессов на внутренней поверхности наружной оболочки.

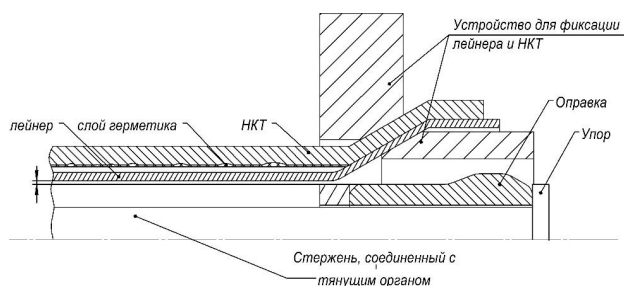


Рис. 1. Схема совместной раздачи труб на оправке

Разрабатываемая технология включает в себя следующие основные операции:

- 1) входной контроль и подготовительные операции;
- 2) калибрование внутренней поверхности НКТ способом раздачи на оправке;
- 3) подготовка концов НКТ и лейнера к раздаче;
- 4) сборка НКТ и лейнера с нанесенным на его наружную поверхность герметиком;
- 5) совместная раздача НКТ и лейнера на оправке;
- 6) полимеризация герметика лейнированной трубы.

Лейнированные насосно-компрессорные трубы, полученные по такой технологии, обладают увеличенным эксплуатационным ресурсом по сравнению с новыми бесшовными трубами благодаря следующим преимуществам:

– за коррозионную стойкость отвечает внутренняя тонкостенная вставка из высоколегированной стали, а за конструктивную прочность – наружная оболочка (насосно-компрессорная труба);

– низкое содержание вредных примесей в металле лейнера, контактирующего с агрессивной средой скважины;

– повышенная пластичность металла лейнера, по сравнению с бесшовной насосно-компрессорной трубой, что обеспечивает ремонтпригодность, надежность и долговечность лейнированных труб;

– чистота внутренней поверхности лейнера,  $R_a$  внутренней поверхности лейнера имеет значения 0,5–0,6 мкм.

– наличие герметика на межслойной границе исключает опасность возникновения электрохимической коррозии между оболочками из разных металлов и повышает надежность их сцепления;

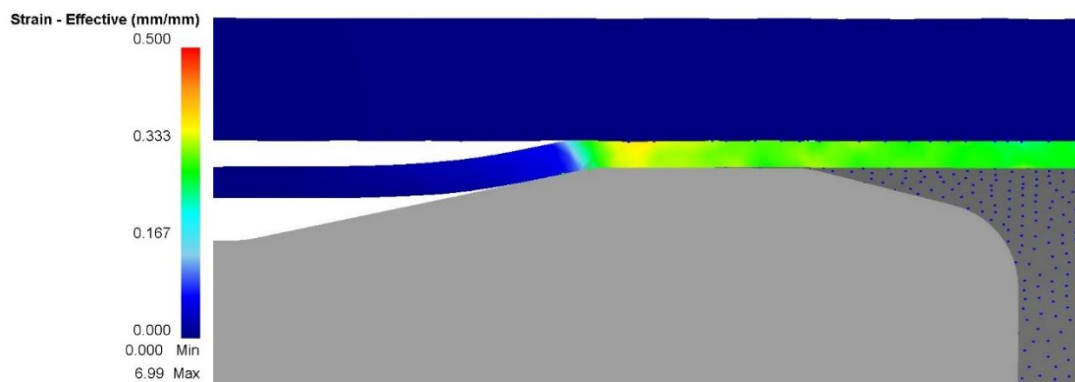
– возможность термообработки по разным режимам для внутренней и наружной оболочки в зависимости от их назначения (обеспечение механической прочности для наружной оболочки и высокой коррозионной стойкости для внутренней).

Предлагаемая технология изготовления лейнированных коррозионностойких труб создается впервые в отечественной и зарубежной практике трубного производства, что подтверждается аналитическим обзором литературы, в которой опубликованы лишь некоторые теоретические результаты, касающиеся технологии производства лейнированных труб. По этой причине необходима разработка требований к заготовкам и проведению отдельных технологических операций изготовления лейнированных труб. Для получения лейнированных насосно-компрессорных труб высокого качества необходимо:

- обеспечение надежного сцепления лейнеров с насосно-компрессорными трубами;
- удовлетворение лейнированных труб требованиям отечественных и зарубежных стандартов по точности размеров, уровню механических свойств и коррозионной стойкости.

С целью решения поставленных задач необходимо исследование напряженно-деформированного состояния труб при совместной деформации на оправке, механики и кинематики течения слоев. Так как процесс является новым и малоизученным, решение поставленных задач выполнялось в пакете конечно-элементного моделирования Deform – 3D, который позволяет решать конструкторские и технологические задачи. Общий вид решения представлен на рис. 2.





**Рис. 2. Общий вид компьютерного моделирования процесса совместной раздачи труб на оправке**

Отличительной особенностью процесса изготовления лейнированных труб способом раздачи на оправке является стадийность деформации составляющих компонентов. На первой стадии происходит упругая раздача лейнера, при достижении интенсивности касательных напряжений предела текучести начинается вторая стадия – пластическая деформация лейнера. Вторая стадия продолжается до тех пор, пока наружная поверхность лейнера не коснется внутренней поверхности НКТ, после чего начинается третья стадия – совместная деформация лейнера и НКТ, причем НКТ деформируется упруго. На этой стадии происходит утонение и удлинение лейнера. При достижении интенсивности касательных напряжений, возникающей в металле НКТ, предела текучести, начинается четвертая стадия – совместная пластическая деформация лейнера и НКТ. После прохождения оправки, начинается разгрузка материалов лейнера и НКТ, за счет большей величины разгрузки НКТ по сравнению с лейнером образуется натяг между оболочками. С учетом особенностей раздачи слоистых композиционных материалов на оправке была разработана конструкция и выполнен расчет размеров оправки, обеспечивающей сцепление исходных труб-заготовок.

#### **Испытание лейнированных насосно-компрессорных труб в промышленных условиях**

Опытные образцы композиционной трубы были изготовлены из шести патрубков изношенных НКТ длиной 1700–1900 мм. На трех из шести изношенных НКТ с дефектами глубиной более 1,9 мм в среднем сечении по длине дополнительно перед лейнированием наносили по четыре сквозных отверстия диаметром 3 мм. Изношенные НКТ лейнировали раздачей электросварными трубами 47×1,5 мм из стали марки 10. Межслойные зазоры и резьбовые соединения сборной трубы были загерметизированы. Па-

трубки соединяли друг с другом на резьбе муфтами. Испытание сборных биметаллических труб осуществлялось на гидравлическом прессе «Brocker» в трубопрокатном цехе №4 ОАО «ПНТЗ». Гидравлическое давление за шесть ступеней изменяли от 14,7 до 56,9 МПа с выдержкой 60 с. Сборная биметаллическая труба длиной 9500 мм выдержала испытание под давлением, которое на 13% превосходило нормативное значение по ГОСТ Р 52203-2004 для НКТ группы прочности Д, изготавливаемых по традиционной технологии. Нарушение герметичности межслойных зазоров и резьбовых соединений с полным сохранением несущей способности по всей длине биметаллической трубы, включая участки со сквозными отверстиями диаметром 3 мм, выполненными сверлением в теле НКТ, не наблюдалось.

Опытно-промышленные партии биметаллических НКТ, полученных способом лейнирования из изношенных труб 73×5,5 мм, имевших дефекты глубиной от 1,9 до 3,4 мм, прошли испытания в промысловых условиях на четырех объектах ОАО «Татнефть». Условия эксплуатации НКТ на всех объектах характеризуются как тяжелые. Тонкостенные электросварные трубы-лейнеры были изготовлены из стали 22ГЮ по ТУ 1373-021-05757850-07. Лейнированные НКТ из опытно-промышленной партии эксплуатируются с 4 марта 2009 г. (в течение более 2000 сут), замечаний к качеству и работоспособности отремонтированных труб нет. Периодический контроль качества НКТ визуальным осмотром и гидроиспытанием, осуществляемые с подъемом труб из скважин, не выявил каких-либо нарушений их качества. После инспекции трубы продолжают эксплуатироваться в штатном режиме.

*Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности № 11.1369.2014/К от 18.07.2014 (№ ГР 114122470051).*

## Список литературы

- Effect of chemical composition and structure on the resistance of oil pipelines to carbon dioxide corrosion / A.V. Ioffe, M.A. Vyboishchik, E.A. Trifonova, and P.V. Suvorov // *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 52, № 1–2, 2010, pp. 46–51.
- Tubing with high corrosion resistance / A.V. Ioffe, T.V. Tetyueva, M.A. Vyboishchik, E.A. Trifonova, and E.S. Lutsenko // *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 52, № 1–2, 2010, pp. 13–19.
- Corrosion-mechanical fracture of tubing from carbon and alloy steels operating in environments containing hydrogen sulfide / A.V. Ioffe, T.V. Tetyueva, M.A. Vyboishchik, S.A. Knyaz'kin, and A.O. Zyryanov // *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 54, № 9–10, 2012, pp. 492–497.
- Special features of corrosion fracture of tubing operating in environments with elevated content of carbon dioxide / S.A. Knyaz'kin, A.V. Ioffe, M.A. Vyboishchik, and A.O. Zyryanov // *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 54, № 9–10, 2012, pp. 498–503.
- Corrosion-mechanical fracture of tube steel in operation / A.V. Ioffe, T.V. Tetyueva, V.A. Revyakin, E.A. Borisenkova, S.A. Knyaz'kin, and T.V. Denisova // *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 54, № 9–10, 2012, pp. 512–518.
- Control of corrosion in oil and gas production tubing / L. Smith // *British Corrosion Journal*, 1999, vol. 34, no. 4, pp. 247–253.
- Corrosion in the Oil Industry / D. Bronde, R. Edwards, A. Hayman, D. Hill, S. Mehta, T. Semerad // *Oilfield review*. P. 4–18.
- ГОСТ Р 52203-2004. Трубы насосно-компрессорные и муфты к ним. Технические условия.
- API Specification 5CT. Specification for Casing and Tubing. Eighth Edition, July 1, 2005. ISO 11960:2004, Petroleum and natural gas industries – Steel pipes for use as casing or tubing for wells.
- An Overview of Corrosion Resistant Alloy Steel Selection and Requirements for Oil and Gas Industry / Sergio Cerruti // AGIP Divisione Esplorazione e Produzione.
- Corrosion Resistant Alloys (CRAs) in the oil and gas industry – selection guidelines update / Bruce D. Craig, Liane Smith. 3rd Ed. September 2011. The Nickel Institute, p. 12.
- Selection guidelines for corrosion resistant alloys in the oil and gas industry / B.D. Craig // *Materials selection for the oil and gas industry*, pp. 1–11.
- Сафонов В.Н., Ким С.К. Эксплуатация осложненного коррозионной фонда скважин в ООО «Лукойл-Коми» // *Инженерная практика*. №1. 2012. С. 50–59.
- Engineering with clad steel / L.M. Smith // *NiDi Series № 10 064*, p. 20, 1992.
- Study on hydro-forming technology of manufacturing bimetallic CRA-lined pipe / Xuesheng Wang, Peining Li, Ruzhu Wang // *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (2005), pp. 373–378.
- TFP and TFT back in town (Tight Fit CRA lined Pipe and Tubing) / A.C. de Koning, H. Nakasugi, Li Ping // *Stainless Steel World*, 2003. P. 1–12.
- Corrosion-Resistant Lined Pump and Compressor Pipe / N.A. Bogatov, A.A. Bogatov, and D.R. Salikhyanov // *Steel in Translation*, Vol. 44, № 11, 2014, pp. 867–869.
- Use of The Lining Method to restore the Service Characteristic of Pump-Compressor Tubing that has exhausted its original service life / N.A. Bogatov, A.A. Bogatov, and D.R. Salikhyanov // *Metalurgist*, Vol. 58, № 11–12, 2014, pp. 1006–1010.
- Пат. 2344266 Российская Федерация, МПК E21B17/01, B32B1/08, F16L9/18, B23K20/16, B21C37/06. Способ изготовления насосно-компрессорных труб / Богатов Н.А. № 2007114162/02, заявл. 17.04.2007; опубл. 20.09.2007.

## INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

## DEVELOPMENT OF MANUFACTURING PROCESS OF CORROSION-RESISTANT PIPES

**Bogatov Nikolay Aleksandrovich** – D.Sc. (Econ.), First Deputy Director General, «TEMP» Scientific and Production Association, Moscow, Russia. E-mail: temp\_@front.ru.

**Bogatov Aleksandr Aleksandrovich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia. E-mail: omd@urfu.ru.

**Salikhyanov Denis Rinatovich** – Postgraduate Student, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia. E-mail: salenhall@gmail.com.

**Abstract.** At present, it is necessary to develop new innovative projects in the Russian oil industry aimed at efficient performance improvement of material resources and their economy. Production and application of layer-composite pipes are advantageous in terms of corrosion protection. There are several production techniques based on metal forming. According to the best practice, the lining technique proves to be rational for tubing manufacturing. The technique would be a combined pipe expansion from dissimilar materials of different properties. It lends a high corrosion resistance and mechanical strength to a pipe, which makes the service life about 4 times longer as compared to monometallic pipes. But the previous foreign practice showed that some specific pipe-production processes need improvement. The article considers new technical solutions in lined pipes manufacturing and results of their performance test.

**Keywords:** Tubing, lining, lined pipes, bimetallic pipes, metal forming, restoring of service characteristics.

## References

- Ioffe A.V., Vyboishchik M.A., Trifonova E.A., and Suvorov P.V. Effect of chemical composition and structure on the resistance of oil pipelines to carbon dioxide corrosion. *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 52, no. 1–2, 2010, pp. 46–51.
- Ioffe A.V., Tetyueva T.V., Vyboishchik M.A., Trifonova E.A., and Lutsenko E.S. Tubing with high corrosion resistance. *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 52, no. 1–2, 2010, pp. 13–19.
- Ioffe A.V., Tetyueva T.V., Vyboishchik M.A., Knyaz'kin S.A., and Zyryanov A.O. Corrosion-mechanical fracture of tubing from carbon and alloy steels operating in environments containing hydrogen sulfide. *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 54, no. 9–10, 2012, pp. 492–497.
- Knyaz'kin S.A., Ioffe A.V., Vyboishchik M.A., and Zyryanov A.O. Special features of corrosion fracture of tubing operating in environments with elevated content of carbon dioxide. *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 54, no. 9–10, 2012, pp. 498–503.
- Ioffe A.V., Tetyueva T.V., Revyakin V.A., Borisenkova E.A., Knyaz'kin S.A., and Denisova T.V. Corrosion-mechanical fracture of tube steel in operation. *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 54, no. 9–10, 2012, pp. 512–518.
- Smith L. Control of corrosion in oil and gas production tubing. *British Corrosion Journal* 1999, vol. 34, no. 4, pp. 247–253.

7. Brondel D., Edwards R., Hayman A., Hill D., Mehta S., Semerad T. Corrosion in the Oil Industry. *Oilfield review*, pp. 4–18.
8. State Standard R 52203-2004. Pump-Compressor Tubes and Couplings for Them. Specifications. Moscow, 2015 (In Russian).
9. API Specification 5CT. Specification for Casing and Tubing. Eight Edition, July 1, 2005. ISO 11960:2004, Petroleum and natural gas industries – Steel pipes for use as casing or tubing for wells.
10. Sergio Cerruti. An Overview of Corrosion Resistant Alloy Steel Selection and Requirements for Oil and Gas Industry. AGIP Divisione Esplorazione e Produzione
11. Bruce D. Craig, Liane Smith Corrosion Resistant Alloys (CRAs) in the oil and gas industry – selection guidelines update. 3rd Ed. September 2011. The Nickel Institute. p. 12.
12. Craig B.D. Selection guidelines for corrosion resistant alloys in the oil and gas industry. *Materials selection for the oil and gas industry*, pp. 1–11.
13. Safonov V.N. and Kim S.K. Performance of the wells of the OOO Lukoil-Komi under corrosive conditions. *Inzh. Praktika*, no. 1, pp. 50-59, 2012.
14. Smith L.M. Engineering with clad steel. *NIDI Series*, no. 10 064, p. 20, 1992.
15. Xuesheng Wang, Peining Li, Ruzhu Wang. Study on hydro-forming technology of manufacturing bimetallic CRA-lined pipe. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (2005), pp. 373–378.
16. A.C. de Koning, H. Nakasugi, Li Ping. TFP and TFT back in town (Tight Fit CRA lined Pipe and Tubing). *Stainless Steel World*, 2003, pp. 1–12.
17. Bogatov N.A., Bogatov A.A., and Salikhyanov D.R. Corrosion-Resistant Lined Pump and Compressor Pipe. *Steel in Translation*, vol. 44, no. 11, 2014, pp. 867–869.
18. Bogatov N.A., Bogatov A.A., and Salikhyanov D.R. Use of The Lining Method to restore the Service Characteristic of Pump-Compressor Tubing that has exhausted its original service life. *Metallurgist*, vol. 58, no. 11–12, 2014, pp. 1006–1010.
19. Bogatov N.A. *Sposob izgotovleniya nasosno-kompressornykh trub* [Method of making pump-compressor tubing]. Patent RF, no. 2344266, 2007.

Богатов Н.А., Богатов А.А., Салихьянов Д.Р. Развитие технологии изготовления труб в коррозионностойком исполнении // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 33–38.

Bogatov N.A., Bogatov A.A., Salikhyanov D.R. Development of manufacturing process of corrosion-resistant pipes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 33–38.

УДК 65.011.56: 621.771: 621.778: 669.21/23.018

## СОЗДАНИЕ НОВЫХ СПЛАВОВ ЮВЕЛИРНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ИЗ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ИХ ОБРАБОТКИ\*

Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Дитковская Ю.Д., Лопатина Е.С., Лебедева О.С., Рудницкий Э.А.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

**Аннотация.** В статье приведен анализ технологии изготовления длинномерных деформированных полуфабрикатов для производства ювелирных цепей из сплавов драгоценных металлов. С применением программного обеспечения, базирующегося на авторских методиках расчета деформационных и энергосиловых параметров холодной сортовой прокатки и волочения, спроектированы новые технологические режимы обработки для новых сплавов на основе золота, серебра и палладия, прошедшие опытно-промышленную апробацию и позволившие повысить технико-экономические показатели производства ювелирных изделий.

**Ключевые слова:** сплавы на основе золота, серебра и палладия, технологические процессы, ювелирные цепи, проволока, сортовая прокатка, волочение.

### Введение

В настоящее время актуально создание новых сплавов ювелирного назначения на основе уменьшающих вредное воздействие на здоровье человека драгоценных металлов и аллергенов, обладаю-

щих повышенными прочностными и эксплуатационными характеристиками и обеспечивающих эффективное производство качественной продукции.

Существующая практика применения единой технологической схемы для сплавов на основе золота, серебра и палладия без учета свойств обрабатываемого материала приводит к нерациональной энергосиловой загрузке оборудования, низкому качеству готовой продукции и высокому проценту брака. Внедрение в производство этих сплавов, обладающих повышенными механическими характеристиками, требует разработки новых технологических режимов изготовления длинномерной продукции для ювелирных цепей. Таким образом,

\* Статья по материалам доклада на международной молодежной научно-технической конференции «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства», состоявшейся 15–17 июня 2015 г. в ФГБОУ ВПО «МГТУ» (г. Магнитогорск) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ №15-38-10185).

© Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Дитковская Ю.Д., Лопатина Е.С., Лебедева О.С., Рудницкий Э.А., 2015



актуальной является задача проектирования рациональных деформационных режимов обработки новых сплавов драгоценных металлов с учетом их механических свойств.

### Материалы и методы исследования

Учеными кафедры обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета (ИЦМиМ СФУ) разработан и запатентован ряд новых ювелирных сплавов на основе золота [1–4], серебра [5] и палладия [6–7]. Предложенные сплавы многокомпонентных систем драгоценных металлов обладают мелкозернистой структурой и высоким уровнем прочностных и эксплуатационных свойств, распределенных равномерно по длине и сечению слитка. Они гипоаллергенны, пригодны для изготовления изделий методами литья и обработки давлением, обеспечивают высокое качество готовой продукции и широкие возможности их применения в ювелирном производстве.

Для исследований применяли общепринятые методы металлографического анализа и теории обработки металлов давлением. В табл. 1 представлены свойства новых сплавов драгоценных металлов. Деформированные образцы отбирались после каждого этапа сортовой прокатки в соответствии с применяемой в заводских условиях технологической схемой изготовления проволоки для производства ювелирных цепей из сплавов драгоценных металлов.

Химический состав новых сплавов драгоценных металлов

Сплав	Массовая доля компонента, %									
	Au	Ag	Pd	Cu	Zn	In	Ru	Sn	Si	Rh
Сплав 1 красное золото [3]	58,5	5,0	–	33,2	2,9	–	0,001	–	–	–
Сплав 2 белое золото [1]	58,5	26,0	8,0	5,5	1,5	0,5	0,01	–	–	–
Сплав 3 серебро [5]	–	93,0	–	4,5	2,3	0,07	–	0,09	0,07	–
Сплав 4 палладий [7]	2,5	12,9	85,5	–	–	–	–	–	–	0,5

Исследования свойств металла проводили на образцах, отобранных после технологических операций сортовой прокатки, волочения и промежуточных отжигов, в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84 и 10446-80 на проведение испытаний методом растяжения. В качестве оборудования применяли универсальную электро-механическую испытательную машину «LFM-

400» (Walter + Bai AG, Швейцария) при следующих условиях: температура 22–25°C, скорость деформирования 20 мм/мин, длина рабочей зоны 50 мм для проката размерами 3,7×3,7 и 2,1×2,1 мм, 100 мм – для проката размерами 1,1×1,1 мм. Проволочные образцы разрывали на универсальной разрывной машине «H5K-S» (Hounsfield teste quipment ltd, Великобритания), специально адаптированной под образцы тонких сечений при следующих условиях: температура 22–25°C, скорость деформирования 200 мм/мин, длина рабочей зоны 100 мм.

Для выявления микроструктуры образцы изначально шлифовали, после чего полировали и в некоторых случаях, для лучшего выявления структуры металла, шлифы протравливали. Металлографические исследования проводили на микроскопе Axio Observer D1m (Carl Zeiss, Германия). Микротвердость определяли при помощи цифрового микротвердомера DM8 (Affri, Италия), предназначенного для определения твердости очень малых (микроскопических) объемов материалов. В качестве индентора при измерении микротвердости применяли правильную четырехгранную алмазную пирамиду с углом при вершине 136°, которая плавно вдавливалась в образец при нагрузках 50 и 200 гр (ГОСТ 9450-76).

### Технические и технологические разработки

Применяемая в ОАО «Красноярский завод цветных металлов им. В.Н. Гулидова» (ОАО «Красцветмет») технология изготовления ювелирных цепей из сплавов драгоценных металлов (рис. 1) характеризуется высокой трудо- и энергоемкостью, большим количеством технологических переделов, сравнительно низкими показателями экономической эффективности производства.

Основными операциями для изготовления длинномерных деформированных полуфабрикатов являются многопереходные процессы холодной сортовой прокатки и волочения. При этом литая заготовка диаметром 8–10 мм в процессе обработки металла изменяет свою форму и размеры вплоть до получения проволоки диаметром 0,25–0,35 мм.

Сортовая прокатка осуществляется в три этапа (28 проходов) с применением промежуточных отжигов. Анализ показал, что распределение деформации по проходам для принятого режима весьма неравномерно, при этом не учитывается упрочнение материала при холодной деформации.

Таблица 1

ции, и в конце первого и второго этапов прокатки коэффициенты вытяжки  $\lambda$  растут. Это неблагоприятно сказывается на обработке металла, ведет к повышению энергосиловой загрузки оборудования и появлению трещин на раскате.

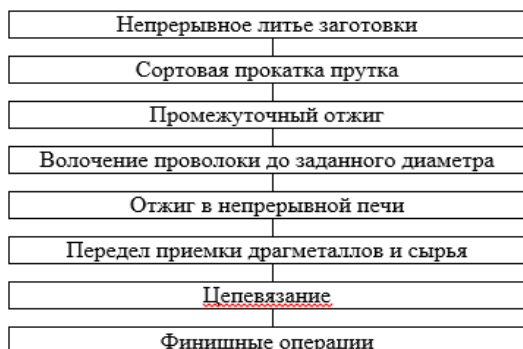


Рис. 1. Типовая схема изготовления ювелирных цепей

Характер распределения деформации по переходам при волочении также неравномерный. При этом коэффициент вытяжки имеет максимальное значение в первом проходе, что приводит к увеличению напряжения волочения и возможности обрывов проволоки.

Следует отметить, что данные деформационные режимы применимы для сплавов, характеризующихся повышенными пластическими свойствами, так как не приводят к браку по указанным выше причинам. Однако обработка сплавов с повышенными прочностными характеристиками неизбежно приводит к его появлению, в том числе и в результате быстрого упрочнения металла, к

которому приводит дробность деформации при прокатке и волочении.

В связи с этим предложены новые технические разработки, заключающиеся в выборе химических составов сплавов многокомпонентных систем драгоценных металлов и методов их модифицирования [8] и обработки [9]. Технологические задачи решались путем рационального распределения деформационных показателей по переходам, определения энергосиловых параметров процессов с учетом свойств деформируемого металла при его обработке на каждом из технологических переделов.

### Результаты исследований и их обсуждение

Для анализа и проектирования новых технологических режимов деформации металла, расчета и моделирования калибровки валков при сортовой прокатке и их изготовления применялась система автоматизированного проектирования «PROVOL» [10, 11]. Особенностью данной программы является ее адаптация к производственным условиям ОАО «Красцветмет». В ней заложены алгоритмы расчета сортовой прокатки прутков в восьмигранных калибрах в непрерывных группах клетей прокатных станов и расчета процесса многократного волочения проволоки со скольжением, применяемые на предприятии при изготовлении различных видов ювелирных цепей из драгоценных металлов.

С помощью этой программы были спроектированы режимы сортовой прокатки (табл. 2) и волочения (табл. 3) для новых сплавов красного и белого золота 585 пробы, серебра 925 пробы и палладия 850 пробы.

Таблица 2

Разработанные режимы сортовой прокатки новых сплавов драгоценных металлов

Номер калибра	Сплав № 1			Сплав № 2			Сплав № 3			Сплав № 4		
	Вытяжка $\lambda$	$\sigma_t$ , МПа	$R_p$ , кН	Вытяжка $\lambda$	$\sigma_t$ , МПа	$R_p$ , кН	Вытяжка $\lambda$	$\sigma_t$ , МПа	$R_p$ , кН	Вытяжка $\lambda$	$\sigma_t$ , МПа	$R_p$ , кН
1	1,43	311,7	32,1	1,24	418,1	47,2	1,32	213,3	24,3	1,95	482,7	59,6
2	1,35	418,2	35,5	1,32	507,4	47,9	1,19	277,4	28,2	1,18	611,4	62,1
3	1,28	436,5	31,6	1,28	544,2	43,8	1,24	317,0	28,2	1,22	637,8	56,8
4	1,24	450,1	28,4	1,22	575,7	40,8	1,31	354,3	26,4	1,33	662,7	49,3
5	1,19	458,8	25,9	1,19	598,4	37,9	1,34	385,9	23,8	1,33	683,4	42,2
6	1,16	464,5	23,8	1,15	615,0	35,6						
7	1,16	468,8	21,8	1,15	627,9	33,2						
8	1,11	472,0	20,6	1,14	639,1	31,1						
9	1,28	385,6	14,3	1,32	521,3	21,2	1,38	410,1	20,5	1,39	440,1	22,0
10	1,27	324,2	10,3	1,27	422,5	16,2	1,55	429,8	16,2	1,55	563,7	21,2
11	1,25	368,8	10,2	1,20	464,8	14,4	1,49	444,3	13,0	1,20	627,8	21,2
12	1,21	398,1	9,7	1,18	497,3	13,9	1,46	452,9	10,4	1,24	651,8	19,0
13	1,20	417,8	9,1	1,14	523,2	13,4	1,17	457,2	9,5	1,21	670,3	17,4
14	1,19	432,5	8,4	1,12	542,8	12,9				1,41	686,9	14,2
15	1,29	369,3	6,1	1,25	469,5	9,7	1,13	458,9	8,9	1,13	398,5	7,7
16	1,28	326,8	4,6	1,27	411,9	7,3	1,26	460,6	7,6	1,37	486,0	7,6
17	1,26	371,9	4,5	1,25	457,7	7,0	1,28	462,6	6,6	1,18	563,2	8,0
18	1,25	402,6	4,2	1,23	498,1	6,7	1,11	463,8	6,1	1,10	593,2	7,8
19	1,19	422,5	4,0	1,22	532,4	6,3	1,23	464,7	5,4	1,23	618,5	7,2
20	1,14	434,6	3,8	1,20	561,0	5,9	1,17	465,6	4,9	1,17	643,5	6,7

Таблица 3

## Разработанные режимы волочения новых сплавов драгоценных металлов

Номер прохода	Вытяжка $k_i$	Сплав 1		Сплав 2		Сплав 3		Сплав 4	
		$\eta$	$P_v, H$	$\eta$	$P_v, H$	$\eta$	$P_v, H$	$\eta$	$P_v, H$
1	1,57	1,65	275,6	1,40	225,7	1,60	117,1	1,46	235,5
2	1,47	1,49	247,5	1,44	168,3	1,30	93,4	1,45	183,6
3	1,42	1,53	183,5	1,52	119,6	1,44	57,8	1,52	131,5
4	1,38	1,62	131,4	1,61	84,4	1,55	37,7	1,61	92,9
5	1,33	1,77	92,2	1,77	58,9	1,72	24,8	1,77	64,7
6	1,31	1,85	68,6	1,84	43,7	1,81	17,6	1,84	48,0
7	1,28	1,98	50,5	1,98	32,2	1,94	12,6	1,97	35,3
8	1,26	2,07	38,5	2,07	24,5	2,05	9,3	2,07	26,8
9	1,25	2,13	30,1	2,13	19,2	2,11	7,1	2,13	21,0
10	1,23	2,25	23,3	2,25	14,8	2,22	5,4	2,25	16,2

Расчет проводился для имеющегося на предприятии оборудования и в соответствии с применяемой на производстве схемой прокатки заготовки диаметром 8 мм до полуфабриката восьмигранного сечения со стороной 1 мм для дальнейшего волочения – в три этапа с применением промежуточных отжигов. Предложенные режимы учитывают повышенные прочностные свойства сплавов, их упрочнение в процессе обработки, а также ограничения по энергосиловым параметрам, обусловленные характеристиками применяемого оборудования.

Разработанные маршруты обеспечивают более равномерное распределение вытяжек по проходам, тем самым создавая благоприятные условия для обработки металла и снижения вероятности возникновения брака готовой продукции (переполнение калибров, образование трещин, обрывы и т.п.).

О целесообразности внедрения предложенных режимов свидетельствует их сравнение с существующими маршрутами сортовой прокатки деформированных длиномерных полуфабрикатов для изготовления ювелирных цепей (рис. 2). Сократилось количество проходов для всех сплавов, а усилие не превысило допустимого. Высокие пластические свойства нового сплава серебра (сплав 3) позволяют вести его обработку по разработанному маршруту без проведения промежуточных отжигов. Для наглядного подтверждения данных выводов приведено изменение коэффициента вытяжки и усилия при прокатке сплава 1.

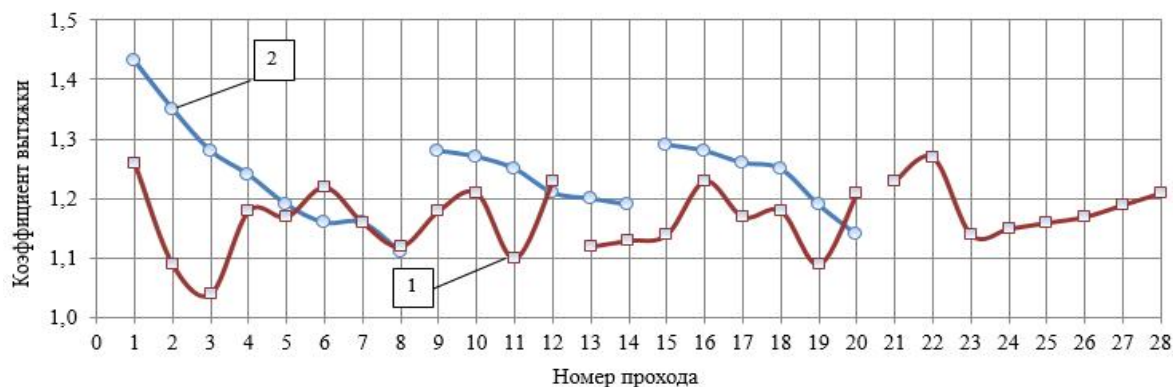
Перераспределение вытяжек по проходам при волочении позволило добиться более равномерного изменения деформации, при этом значения усилий волочения ( $P_v$ ) не превышают допустимых величин. Кроме того, повышаются значения коэффициента запаса ( $\eta$ ), свидетельствующие о снижении риска образования брака в виде обрыва проволоки (рис. 3).

Результаты исследований механических свойств полуфабрикатов из рассматриваемых сплавов при различных степенях деформации приведены в табл. 4.

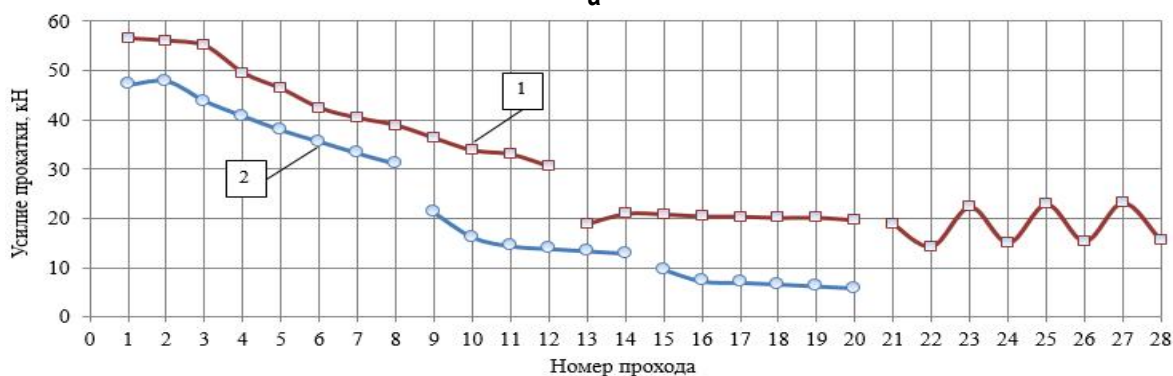
Апробация предложенных режимов сортовой прокатки и волочения, в том числе в условиях ОАО «Красцветмет», показала, что их применение для изготовления проволоки из новых сплавов позволяет повысить технико-экономические показатели производства, эксплуатационные характеристики ювелирных изделий и получить однородную волокнистую структуру и равномерное распределение механических свойств по длине и сечению изделия (рис. 4) за счет модифицирования сплава рутением в заявленных количествах [8].

Выход годного при изготовлении цепей типа «Снейк» из проволоки, полученной по предложенной технологии для сплава 1, составил около 70%, что на 9,7% выше среднего для производства таких цепей из сплава золота 585 пробы, применяемого на заводе.



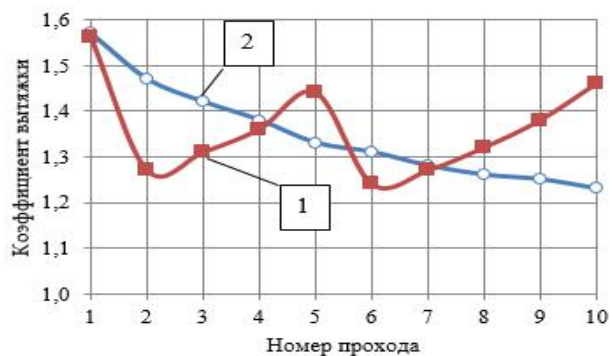


а

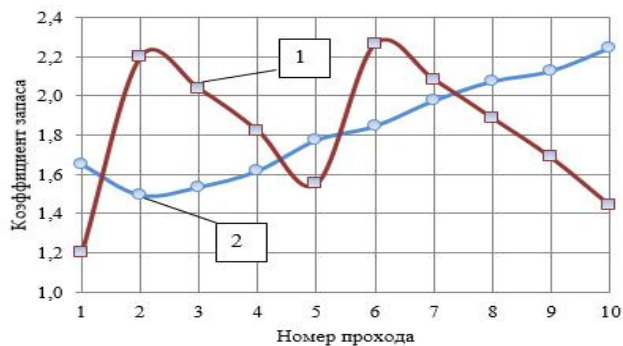


б

Рис. 2. Изменение коэффициента вытяжки (а) и усилия (б) по проходам для существующего (1) и предложенного (2) маршрутов сортовой прокатки сплава 1



а



б

Рис. 3. Изменение коэффициента вытяжки (а) и коэффициента запаса (б) по проходам для существующего (1) и предложенного (2) маршрутов волочения сплава 1

Таблица 4

## Механические свойства новых сплавов драгоценных металлов

Номер прохода	Степень деформации, %	Сплав 1		Сплав 2		Сплав 3		Сплав 4	
		$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
1	78,6	979,7	0,6	626,4	4,0	420,3	1,3	688,4	0,8
2	67,8	929,0	1,2	599,7	2,4	392,3	5,0	659,8	1,4
3	72,5	952,3	2,7	611,7	1,5	404,7	4,5	672,8	2,5

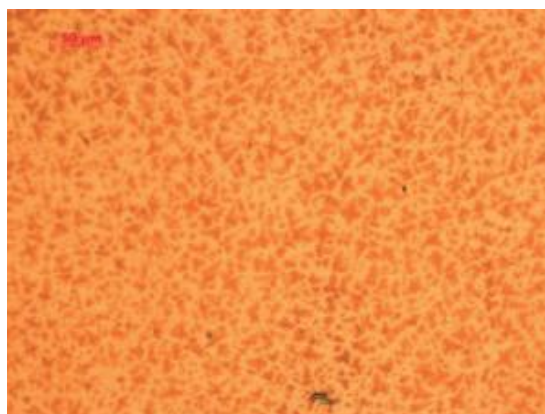


Рис. 4. Структура сплава 1 в литом состоянии

## Заключение

Таким образом, предложены для промышленного использования сплавы на основе золота, серебра и палладия, обладающие повышенным уровнем механических и эксплуатационных свойств. Для данных сплавов разработаны технологические схемы для получения проволоки ювелирного назначения с помощью операций сортовой прокатки и волочения.

Разработанная технология позволяет снизить трудоемкость производства, повысить качество готовой продукции, увеличить выход годного и снизить процент брака при изготовлении ювелирных изделий.

## Список литературы

1. Пат. 2430982 Российская Федерация. Сплав на основе золота белого цвета 585 пробы / Сидельников С.Б., Мальцев Э.В., Довженко Н.Н. [и др.], 2011.
2. Пат. 2439179 Российская Федерация. Сплав на основе золота белого цвета 585 пробы / Сидельников С.Б., Мальцев Э.В., Довженко Н.Н. [и др.], 2012.
3. Пат. 2391425 Российская Федерация. Сплав на основе золота / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Биронт В.С. [и др.], 2010.
4. Пат. 2514898 Российская Федерация. Сплав красного цвета на основе золота 585 пробы / Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Лопатина Е.С. [и др.], 2014.
5. Пат. 2513502 Российская Федерация. Сплав белого цвета на основе серебра 925 пробы, модифицированный кремнием / Сидельников С.Б., Беляев С.В., Столяров А.В. [и др.], 2014.
6. Пат. 2392339 (РФ). Сплав на основе палладия / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Биронт В.С. [и др.], 2010.
7. Заявка 2014130807 Российская Федерация. Сплав на основе палладия 850 пробы / Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Беляев С.В. [и др.], 2014.
8. Пат. 2507284 Российская Федерация. Способ модифицирования сплавов на основе золота / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Лопатина Е.С. [и др.], 2014.
9. Разработка и исследование технологии получения деформированных полуфабрикатов из сплавов золота 585 пробы / Сидельников С.Б., Беляев С.В., Лебедева О.С., Павлов Е.А., Столяров А.В., Усков И.В., Феськов Е.В., Гайлис Ю.Д. // Цветные металлы – 2012. 2012. С. 802–807.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612273 / Сидельников С.Б., Беляев С.В., Лебедева О.С. [и др.], 2015.
11. Разработка подсистемы САПР технологических процессов производства ювелирных изделий / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Гайлис Ю.Д., Лебедева О.С. // Известия МГТУ «МАМИ». Сер. 2. Технология машиностроения и материалы. 2013. №2(16). Т.2. С. 216–220.

## INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

## CREATION OF NEW JEWELRY ALLOYS FROM MULTICOMPONENT PRECIOUS-METAL SYSTEMS AND THEIR PROCESSING TECHNOLOGIES

**Sidelnikov Sergey Borisovich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.  
E-mail: sbs270359@yandex.ru.

**Dovzhenko Nikolay Nikolaevich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

**Ditkovskaya Yulia Dmitrievna** – Postgraduate Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

**Lopatina Ekaterina Sergeevna** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

**Lebedeva Olga Sergeevna** – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

**Rudnitsky Edvard Anatolevich** – Ph.D. (Eng.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

**Abstract.** The article presents the analysis of manufacturing technology of long deformed semi-finished products for jewelry-chain production from precious metal alloys. New conditions for gold-silver-palladium-based alloy processing have been designed with the software based on the proprietary calculation techniques of deformation and power parameters of cold section rolling and drawing. Being successfully piloted, the conditions ensured improvement of jewelry production performance indicators.

**Keywords:** Gold-silver-palladium-based alloys, technological processes, jewelry chains, wire, section rolling, drawing.

#### References

1. Sidelnikov S. B. et al. *Splav na osnove zolota belogo cveta 585 proby* [An Alloy Based on 585 Probe White Gold]. Patent RF, no. 2430982, 2011.
2. Sidelnikov S. B. et al. *Splav na osnove zolota belogo cveta 585 proby* [An Alloy Based on 585 Probe White Gold]. Patent RF, no. 2439179, 2012.
3. Sidelnikov S. B. et al. *Splav na osnove zolota* [An Alloy Based on Gold]. Patent RF, no. 2391425, 2010.
4. Dovjhenko N.N. et al. *Splav krasnogo cveta na osnove zolota 585 proby* [An Alloy Based on 585 Probe Red Gold]. Patent RF, no. 2514898, 2014.
5. Sidelnikov S. B. et al. *Splav belogo cveta na osnove serebra 925 proby, modifitsirovanniy kremniem* [An White Color Alloy Based on 925 Probe Silver Modified with Silicon]. Patent RF, no. 2513502, 2014.
6. Sidelnikov S. B. et al. *Splav na osnove palladiya* [An Alloy Based on the Palladium]. Patent RF, no. 2392339, 2010.
7. Dovjhenko N. N. et al. *Splav na osnove palladiya 850 proby* [Alloy Based on 850 Probe Palladium]. Application for patent RF no. 2014130807, 2014.
8. Sidelnikov S. B. et al. *Sposob modifitsirovaniya splavov na osnove zolota* [A Method of Gold-based Alloys Modifying]. Patent RF, no. 2507284, 2014.
9. Sidelnikov S.B., Belyaev S.V., Lebedeva O.S., Pavlov E.A., Stolyarov A.V., Uskov I.V., Feskov E.V., Gaylis Y.D. *Razrabotka i issledovanie tehnologii polycheniya deformirovannih polufabrikatov iz splavov zolota 585 proby. Cvetniye metally – 2012* [Non-ferrous metals – 2012]. 2012, pp. 802–807.
10. Sidelnikov S. B. et al. Certificate of computer program state registration no. 2015612273, 2015.
11. Sidelnikov S. B., Dovjhenko N. N., Gaylis Y. D., Lebedeva O. S. *Razrabotka podsistemy SAPR tehnologicheskikh pocessov proizvodstva yuvelirnyh izdeliy. Izvestiya MGTU «MAMI»* [MSTU "MAMI" Proceedings]. 2013, vol. 2, no. 2, pp. 216-220.

Создание новых сплавов ювелирного назначения из многокомпонентных систем драгоценных металлов и технологий их обработки / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Дитковская Ю.Д., Лопатина Е.С., Лебедева О.С., Рудницкий Э.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 38–44.

Sidelnikov S.B., Dovjhenko N.N., Ditkovskaya Yu.D., Lopatina E.S., Lebedeva O.S., Rudnitsky E.A. Creation of new jewelry alloys from multicomponent precious-metal systems and their processing technologies. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 38–44.



# РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. ГЕОЛОГИЯ, ГЕОДЕЗИЯ

УДК 658

## К ВОПРОСУ СОКРАЩЕНИЯ СТОИМОСТИ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ НА РУДНИКАХ ЗФ ПАО «ГМК "НОРИЛЬСКИЙ НИКЕЛЬ"»

Монтянова А.Н.<sup>1</sup>, Вильчинский В.Б.<sup>2</sup>, Трофимов А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Технологии закладки выработанного пространства», Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация.** Снижение затрат на закладочные работы повышает эффективность работы горнодобывающих предприятий, осуществляющих добычу руды системами разработки с закладкой выработанного пространства.

В статье рассмотрены способы снижения стоимости закладочных смесей за счет введения в их состав пластифицирующей добавки ЛСТ или стабилизаторов твердения, таких как ConcreCem (CC) и RoadCem (RC), или отходов промышленности.

Объектом изложенных в статье исследований является технология закладочных работ на рудниках ЗФ ПАО «ГМК "Норильский никель"».

Предусмотрена масштабная проверка полученных результатов на лабораторной стадии исследований и в процессе опытно-промышленных работ непосредственно в условиях рудников Заполярья.

**Ключевые слова:** закладка, выработанное пространство, добавки к смесям, стабилизаторы твердения, твердеющая смесь, прочность при сжатии, сокращение стоимости закладки.

### Введение

Закладка выработанного пространства является неотъемлемым процессом добычи руды соответствующими системами разработки, составляя значительную часть затрат в себестоимости последних. Снижение затрат на закладочные работы повышает эффективность работы горнодобывающих предприятий.

Наиболее используемые эффективные способы снижения стоимости возведения твердеющих массивов: сокращение расхода в смесях дорогостоящего цемента; вовлечение в производство минеральных смесей местных материалов и отходов производства; повышение качества возводимых искусственных массивов (снижение водоотделения и усадки, повышение однородности и т.д.) [2, 4, 5].

### Материалы и методы исследования

Годовой объем закладочных работ на рудниках ЗФ ПАО «ГМК "Норильский никель"» (далее ЗФ) достигает 4 млн м<sup>3</sup>. Затраты на закладку составляют порядка 4 млрд руб./год.

В настоящее время на рудниках ЗФ при производстве закладочных смесей используются эффективные средства сокращения их стоимости. Впервые в практике закладочных работ был обоснован, внедрен и эффективно используется «мельничный способ» получения закладочных смесей. Вовлечены в производство гранулированные шлаки Надеждинского металлургического завода, хвосты обогащения, местные ангидритовые породы. Цемент М300 производится местным заводом. Выпускаются многокомпонентные закладочные смеси: ШЩЦ – на основе гранулированных шлаков, базальтового щебня и цемента; АШЦ – на основе ангидрита, шлака и цемента; АШЩЦ – на основе ангидрита, шлака, щебня и цемента и ШХЦ – на основе шлака, хвостов обогащения и цемента (рис. 1).

Вместе с тем резервы для дальнейшего сокращения себестоимости закладки имеются. В данной статье рассмотрена возможность применения с отмеченной целью пластифицирующих добавок и стабилизаторов твердения, а также отходов промышленности, не используемых в настоящее время на рассматриваемых рудниках.

© Монтянова А.Н., Вильчинский В.Б., Трофимов А.В., 2015

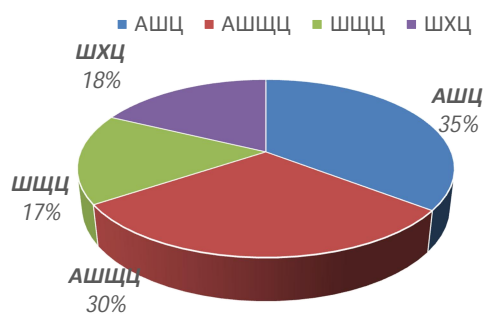


Рис. 1. Удельный вес составов закладки на рудниках ЗФ

Известно шарокомасштабное опробование в закладочных смесях различных добавок, применяемых в строительстве [1] (рис. 2). Проведенные исследования показали, что наиболее эффективно использование при производстве закладочных смесей лигносульфонатов технических (ЛСТ), механизм действия которых основан на адсорбционном взаимодействии не только с продуктами гидратации цемента, но и со шламовым тонкодисперсным ингредиентом, составляющим основную часть твердого в закладочных смесях.

Эффективное применение лигносульфоната технического в качестве средства сокращения затрат на закладочные работы доказано 15-летней практикой на рудниках АК «АЛРОСА». Установлено, что введение в закладочные смеси ЛСТ позволяет увеличить их растекаемость в выработанном пространстве с 40 до 80 м, снижает водоотделение от закладочного массива в два раза, снижает расслоение и усадку, повышает прочность закладки и позволяет получить экономию цемента ~ 50 кг портландцемента на 1 м<sup>3</sup> в среднем по маркам закладки [2–4].

Вместе с тем из практики строительства известно эффективное применение с целью сокращения затрат на продукцию новых прогрессив-

ных порошкообразных добавок, к числу которых относятся стабилизаторы твердения, например, ConcreCem (CC) и RoadCem (RC). Продукция производится в Нидерландах. Опробование данных продуктов в закладочных смесях ранее не проводилось. Авторами статьи исследована эффективность использования в закладочных смесях указанных добавок и отходов производства, таких как золошлаки Никелевого завода и известняковая мука. При этом подвижность закладочных смесей принята из условия их доставки в выработанное пространство трубопроводным транспортом в самотечном режиме – растекаемость на приборе Суттарда – 28...30 см. Образцы, изготовленные методом формования, испытывались на прочность при сжатии в различные сроки твердения в нормальных условиях. Часть образцов испытана на деформационные свойства.

Выполненными исследованиями подтверждено положительное влияние гранулированного шлака на прочность закладки (заполнитель – базальтовый щебень) (рис. 3). Установлено, что при введении пластифицирующей добавки ЛСТ в закладочные смеси на основе шлака и щебня (ШЩЦ) закладка характеризуется ускоренным набором прочности до возраста 28 сут твердения (рис. 4). В более продолжительные сроки процесс твердения замедляется с уменьшением дозы цемента в смеси. Оптимальная доза ЛСТ – 1,2 кг/м<sup>3</sup>. При этом достигается сокращение расхода цемента до 20–25% без потери прочности закладки.

Добавка СС негативно влияет на прочность закладки ШЩЦ. При добавлении в смеси модификатора RC состав ШЩЦ медленно набирает прочность, но в возрасте 90 сут имеет значительный прирост прочности по сравнению с базовым составом, что позволяет сократить до 35% цемента без потери прочности закладки (рис. 5).

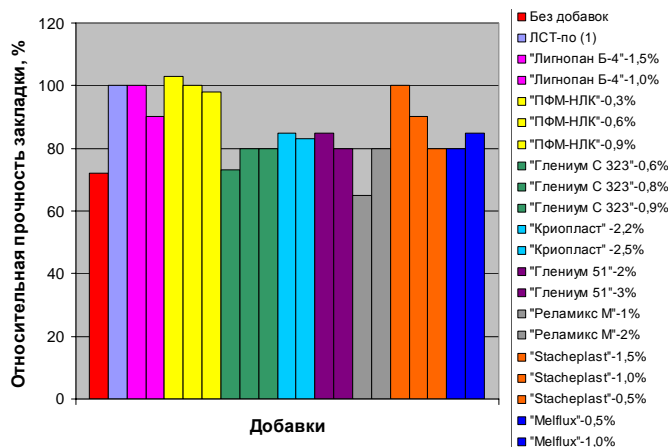


Рис. 2. Влияние добавок на прочностные показатели закладки на основе портландцемента и мелкозернистого песка

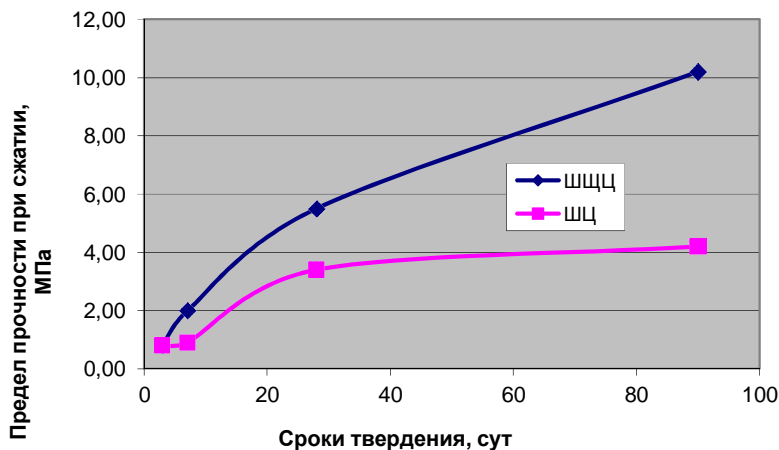


Рис. 3. Влияние гранулированного шлака Надеждинского металлургического завода на прочность закладочных смесей

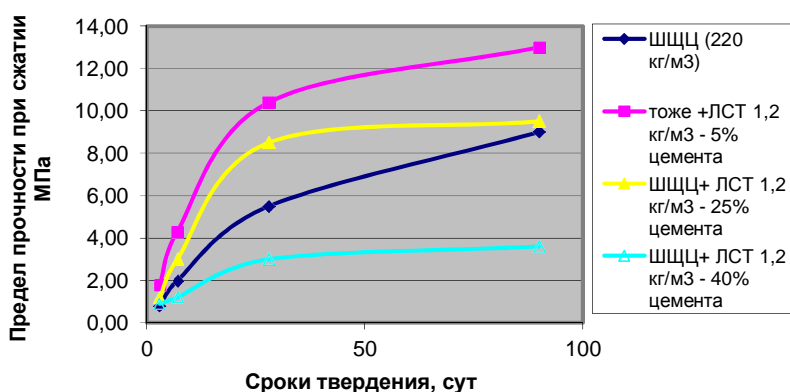


Рис. 4. Влияние ЛСТ на прочность закладки ШЩЦ при сокращении расхода цемента

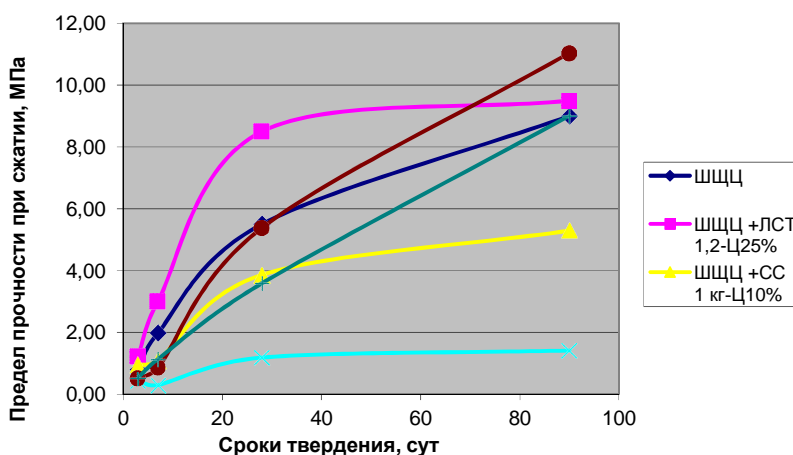


Рис. 5. Влияние стабилизаторов твердения на прочность закладки в сравнении с влиянием ЛСТ и бездобавочным составом

Использование рассматриваемых добавок в составах закладочных смесей на основе хвостов обогащения (ШХЦ) менее эффективно (рис. 6). Хвосты обогащения подаются в закладочную смесь в водонасыщенном состоянии, что минимизирует адсорбционное воздействие добавки ЛСТ. Использование добавки СС также не дает

положительных результатов. Введение в смесь ШХЦ добавки РС позволяет получить экономию цемента ~ 15% без потери прочности закладки.

Установлено также, что введение в состав закладочных смесей известковой муки, полученной помолотом отсева дробления известняка Верхне-Тамулахского месторождения, при равном коли-

честве цемента с базовыми составами не оказывает существенного влияния на прочность (рис. 7).

Твердеющая смесь при введении в ее состав золошлака никелевого завода и одновременном сокращении цемента отличается замедленными темпами набора прочности. Однако, например, в возрасте 90 сут процент снижения прочности (20 и 30%) ниже процента снижения расхода цемента (35 и 50% соответственно), что свидетельствует об

активности золошлака (рис. 8). Данное положение необходимо перепроверить дополнительными исследованиями, в т.ч. путем выявления в золошлаках активных окислов кремнезема и глинозема.

Выявлено, что введение в состав закладочных смесей лигносульфоната или стабилизаторов твердения снижает модуль деформации закладки в 2 раза: 11–12 ГПа – бездобавочные высокомарочные составы; 5–6 ГПа – составы с добавками.

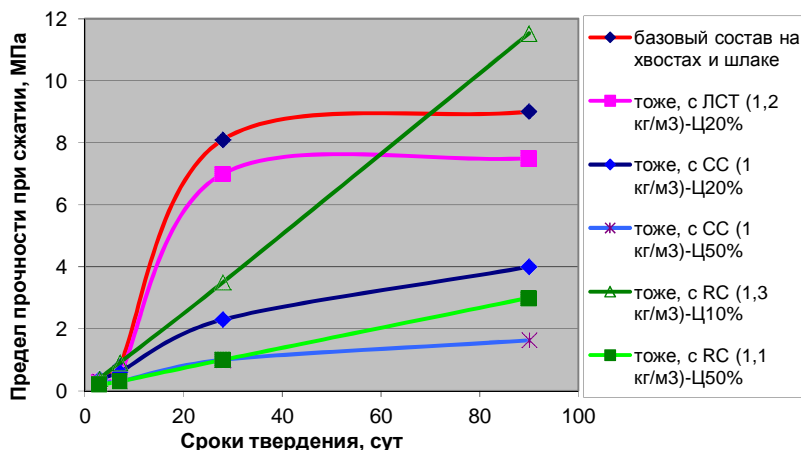


Рис. 6. Влияние различных добавок на прочностные показатели закладки на основе хвостов обогащения

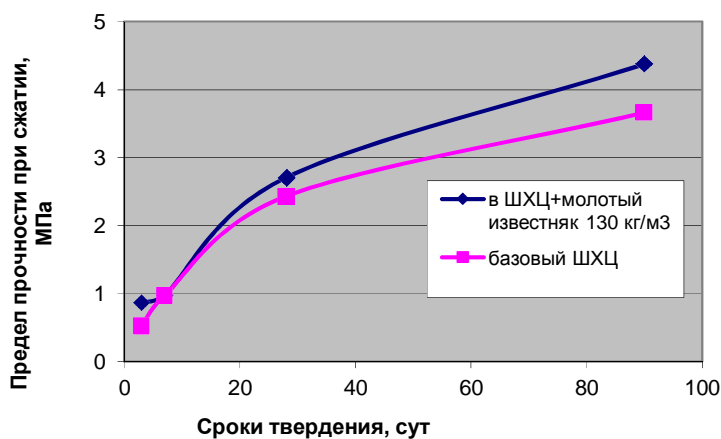


Рис. 7. Влияние известковой муки на прочность закладки

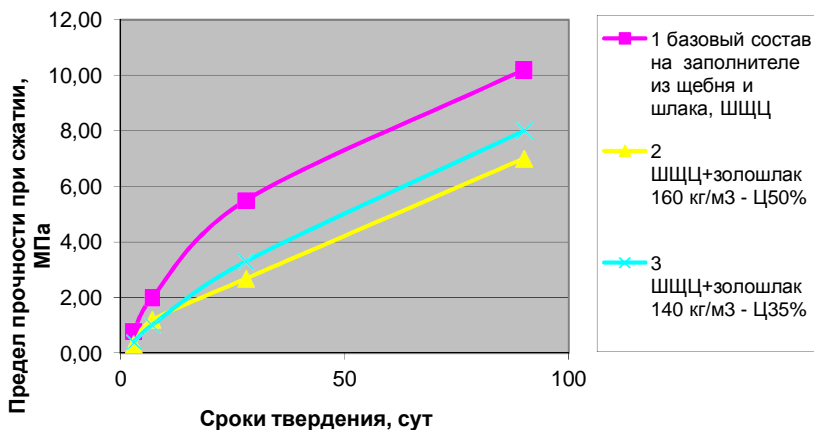


Рис. 8. Влияние золошлака Никелевого завода на прочность закладки



### Заключение

Укрупненным экономическим расчетом определено, что ожидаемый эффект от применения лигносульфоната технического в составах на основе шлака и щебня составляет 80 млн руб./год, а добавки РС – несколько ниже, 60 млн руб./год (стоимость голландских стабилизаторов выше стоимости ЛСТ в 6 раз). На данной стадии исследований не установлена эффективность использования рассматриваемых добавок в составах смесей на основе хвостов обогащения.

В связи с ограниченным количеством исходных материалов результаты исследований являются предварительными. Предусмотрена их масштабная проверка на лабораторной стадии исследований и в процессе опытно-промышленных работ непосредственно в условиях рудников.

### Список литературы

1. Монтянова А.Н., Гаркави М.С., Косова Н.С. Специфические особенности и эффективность применения добавок в закладочных смесях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. №9. С. 287–295.
2. Монтянова А.Н. Формирование закладочных массивов при разработке алмазных месторождений в криолитозоне. М.: Горная книга, 2005. 597 с.
3. Специфические особенности закладочных работ на руднике «Мир» алмазодобывающей АК «АЛРОСА» / А.Н. Монтянова, Д.С. Кириллов, И.В. Штауб, Е.В. Бильдушкинов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета. 2012. № 4. С. 10–14.
4. Исследование физико-механических свойств отходов обогащения для разработки технологии формирования закладочного массива в выработанном пространстве карьера «Учалинский» / О.В. Зотеев, В.Н. Калмыков, А.А. Гоготин, Ан. А. Зубков, А.А. Зубков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 4 (44). С. 13–17.
5. Изыскание вариантов систем разработки для выемки прибортовых запасов при комбинированной геотехнологии / Калмыков В.Н., Григорьев В.В., Волков П.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. № 1 (29). С. 18–23.

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

#### ON STOWING MATERIALS COST REDUCTION AT THE MINES OF THE TRANSPOLAR BRANCH OF THE NORILSK NICKEL MINING AND METALLURGICAL COMPANY PAO

**Montianova Antonina Nikolaevna** – D. Sc. (Eng.), LLC Goaf Stowing Technologies, Moscow, Russia.

**Vilchinsky Vladislav Borisovich** – Ph.D. (Eng.), LLC Guipronickel Institute, Saint-Petersburg, Russia.

**Trofimov Andrey Viktorovich** – Ph.D. (Eng.), LLC Guipronickel Institute, Saint-Petersburg, Russia.

**Abstract.** Cost reduction on stowing operations promotes efficiency of mining companies producing ore with goaf-stowing mining methods.

The article considers methods of cost reduction on stowing mixtures by adding either lignosulfonate as a plasticizer or soil stabilising additives such as ConcreCem (CC) and RoadCem (RC) or industrial wastes.

The stowing technology used at the mines of the transpolar branch of the Norilsk Nickel Mining and Metallurgical Company is an object of the study.

The laboratory and pilot results obtained at the mines of the transpolar branch are to be substantially verified.

**Keywords:** Stowing, goaf, additives to mixtures, soil stabilising additive, solidifying stowing mixture, compression strength, stowing cost reduction.

#### References

1. Montianova A.N., Garkavi M.S., Kosova N.S. Specific features and efficiency of additives application in stowing mixtures. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Notes]. 2009, no. 9, pp. 287-295.

Монтянова А.Н., Вильчинский В.Б., Трофимов А.В. К вопросу сокращения стоимости закладочных смесей на рудниках ЗФ ПАО «ГМК "Норильский никель"» // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 45–49.

Montianova A.N., Vilchinsky V.B., Trofimov A.V. On stowing materials cost reduction at the mines of the transpolar branch of the Norilsk nickel mining and metallurgical company PAO. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 45–49.

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВОДОНАСЫЩЕНИЯ НА ДЕЗИНТЕГРАЦИЮ ВЫСОКОГЛИНИСТЫХ ПЕСКОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РОССЫПЕЙ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Хрунина Н.П., Чебан А.Ю.

Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Хабаровск, Россия

**Аннотация.** Рассмотрены результаты исследования песков высокоглинистого россыпного месторождения благородных металлов руч. Поспелиха Приморского края. Установлено, что пески исследуемой золотоносной россыпи являются достаточно сложным объектом для дезинтеграции из-за оксидов железа и глинистых минералов монтмориллонитовой группы. Экспериментально-аналитическим путем определен характер изменения упругих характеристик исследуемых песков при водонасыщении. Получены данные о влиянии водонасыщения на трудно-промывистые глинистые пески для обеспечения последующей дезинтеграции. Предложена оценка влияния водонасыщения при разработке высокоглинистых песков на основе расчета динамики изменения упругих характеристик. Рассматривается способ управления подготовкой к дезинтеграции песков с учетом предлагаемой динамической характеристики песков при водонасыщении. Отмечается, что исследования в данном направлении, в том числе экспериментальные и аналитические, требуют дальнейшего развития.

**Ключевые слова:** водонасыщение, элементный состав, фазовый анализ, волновое сопротивление, дезинтеграция, скорость ультразвука, модуль продольного растяжения, динамика изменения упругой характеристики.

### Введение

Одной из наиболее сложных задач при освоении россыпей различных типов является извлечение мелкого и тонкого золота, которого, по оценке специалистов, в процессе эксплуатации теряется до 70–80%. Потери золота обусловлены рядом факторов: крупностью и формой золотин; повышенным содержанием мелких и тонких фракций; характеристикой вмещающих пород, величиной глинистой составляющей; режимом работы промывочных агрегатов и др. Новые знания о трансформации физико-химических свойств ценных компонентов, их морфологических характеристиках, позволили научно обосновать последствия этих процессов для возобновления ресурсного потенциала россыпных месторождений. Выявлено влияние безнапорных водных потоков, частотных колебаний массива техногенных аллювиальных пород природного или антропогенного характера на вещественный и фазовый состав, криогенные и суффозионные процессы, параметры миграции и концентрации золота в отвалах техногенных россыпных образований. В процессах добычи особая роль отводится способам эффективного предварительного разрушения путем направленного изменения состояния жестких структурных связей песков. Основопологающие принципы решения этих проблем были сформули-

рованы в работах М.И. Агошкова, Н.В. Мельникова, Ф.Д. Овчаренко, В.В. Ржевского, К.Н. Трубецкого, В.А. Чантурия и других [1–11].

В работе [1] исследовано влияние криогенных и фильтрационных процессов на разрыхление горной массы и концентрацию ценных компонентов в массиве пород и установлено, что коэффициент фильтрации изменяется на несколько порядков. Из **таблицы** видно, что глинистые породы имеют разброс коэффициента фильтрации от двух до четырех порядков. Глина имеет коэффициент фильтрации, свидетельствующий о слабой динамике разупрочняющего процесса в естественных условиях залегания песков.

**Коэффициент фильтрации однородных материалов [1]**

Наименование материала	Коэффициент фильтрации, см/с
Песок чистый	1,0–0,01
Песок глинистый	0,01–0,005
Супесь	0,005–0,003
Суглинок карбонатный	0,001–0,0005
Глина	0,0005–0,000005

Известна минимальная размывающая скорость в зависимости от среднего диаметра частиц горной массы, параметры струи, выходящей из насадки гидромонитора, и другие параметры. В работе [1] рассмотрена теоретическая модель миграции ценных компонентов в стесненных условиях в обводненной аллювиальной среде под действием виброколебаний на основе показателя

вибрационной крупности и экспериментально исследована миграция ценных компонентов в увлажненной горной массе под действием колебательных процессов, создаваемых акустическим источником излучения с частотой 100 Гц. Однако данные исследования ограничены узкими рамками энергетического воздействия на увлажненные пески и рассмотрены в контексте возможного перемещения минеральных частиц. Не учитывались факторы структурных и физико-механических изменений, степень водонасыщения по отношению к пескам с разной пластичностью.

Качество трансформации песков в значительной степени определяется возможностью интенсификации процесса средствами, способными изменить физическое состояние и структурно-механические параметры перерабатываемых песков. В уплотненной высокоглинистой среде частицы песков и минеральных компонентов имеют достаточно прочные связи. Исследования дезинтеграции песков с повышенным содержанием глини лежат в области происходящих динамических взаимодействий между рабочим органом и породной массой. Сюда относятся разнообразные эффекты понижения прочности вследствие физико-механического влияния, состоящего в понижении удельной свободной поверхностной энергии твердого тела. Отличительная особенность этих явлений состоит в том, что они наблюдаются только в среде, находящейся в определенном напряженном состоянии. Реальные процессы всегда в той или иной мере неравновесны. Процессы дезинтеграции песков россыпей неразрывно связаны с реальной (дефектной) структурой участка массива и условиями деформации и разрушения. Большое значение имеют исходные механические свойства песков и их структура, дисперсность, наличие пористости, процессы возникновения и развития дефектов, зарождения, движения и выхода дислокаций. Характер механических деформационных воздействий влияет на скорость и степень понижения прочности или на стимуляцию пластического течения породы [12–14].

#### **Постановка проблемы и методы исследований**

Освоение новых объектов высокоглинистых песков россыпей ДВ региона требует их детального изучения, при этом особого внимания заслуживают пески с повышенным содержанием мелкого, тонкого, пластинчатого золота и в

сростках. К процессам первичного влияния на дезинтегрируемость песков относится их водонасыщение, поэтому исследование изменения состояния золотоносных песков при водонасыщении, играющем значительную роль в разрушении структурных связей между глинистыми частицами и агрегатами при дезинтеграции и последующем выделении ценных компонентов, является особо важным. Одним из характерных месторождений, участки которого имеют высокое содержание мелких глинистых частиц в песковой фракции, является золотоносная россыпь в пойме руч. Пospelиха (Приморский край).

Цель исследований состояла в экспериментальном и аналитическом определении структурно-механических свойств, элементного состава, фазового анализа проб руч. Пospelиха. Измерения проводились на приборах и оборудовании Центра коллективного пользования ИГД ДВО РАН, Института материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН и Испытательного центра ДВГУПС. Экспериментальным путем определялась плотность, влажность, скорость ультразвука в образцах. Спектрометрический анализ выполнен на рентгенофлуоресцентном спектрометре Mobilab X-50. Фазовый анализ проб изучался с помощью дифрактометра ДРОН-7 с напряжением трубки 40 кВ, током накала 20 мА и шагом сканирования по углу  $2\theta$  0,05 град. Для идентификации линий рентгеновских спектров использовался программный пакет PDWin (НПП «Буревестник»). Для определения упругих характеристик песков с помощью прибора «Пульсар – 1.1» измерялась скорость продольных волн в образцах с естественной влажностью. Рабочая частота составляла 60 кГц. Эксперимент проводился при средней температуре воздуха 21,4°C и относительной влажности 69% (протокол контрольных испытаний № 89/14 от 06.06.2014 г.).

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

В пробах исследуемого месторождения руч. Пospelиха установлено содержание нонтронита (nontronite), который относится к минералам группы монтмориллонита – вермикулита. Монтмориллониты относятся к трудноразрушаемым. Спектроскопия показала преобладание по массе соединений Fe, а также содержание K, Ca, Ti, Ba, Zr, Cr, Sr, Cu, Zn, Rb, W и других соединений. На рис. 1 представлена спектрограмма одного из образцов месторождения руч. Пospelиха.

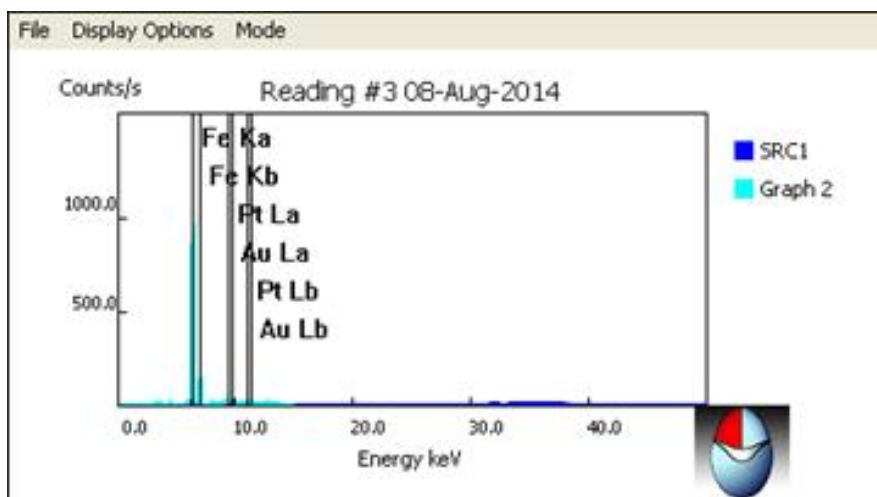


Рис. 1. Спектрограмма образца 1.1.1 месторождения руч. Пospelиха

Присутствие глинистых минералов, которые образуют трудноразрушаемые структурные связи, а также выявленное преобладание в пробах соединений железа Fe, предопределяет усложнение процесса глубокой дезинтеграции песков для извлечения мелкого и тонкого золота.

Установление экспериментальным путем значений плотности, естественной влажности, скорости прохождения ультразвукового импульса в продольной волне в образцах двух участков месторождения руч. Пospelиха позволило расчетным путем определить эффективную сжимаемость твердого (скелета вещества), равновесную эквивалентную плотность  $\rho$  при водонасыщении до 30% и скорость продольных ультразвуковых волн  $V$  при равновесной эквивалентной плотности, прочностные свойства песков: модуль сдвига  $\mu$  (вторая компонента Ламе), модуль продольного растяжения  $E$  (модуль Юнга), как при естественной влажности, так и при влажности по массе, равной 30%. Скорость продольных ультразвуковых волн  $V$  в водонасыщенных песках определялась из выражения [5]

$$V = \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot \beta}},$$

где  $\rho$  – равновесная эквивалентная плотность при водонасыщении до 30%, определенная расчетным путем, кг/м<sup>3</sup>;  $\beta$  – эффективная сжимаемость водонасыщенных песков с учетом сжимаемости твердого и жидкой составляющей, (м·с<sup>2</sup>)/кг.

Модуль сдвига  $\mu$  и первая компонента Ламе  $\lambda$  для песков с естественной влажностью и водонасыщенных песков (до 30%) определялись по формулам [5]:

$$\begin{aligned} \mu &= \rho \cdot V_1^2, \\ \lambda &= \rho (V^2 - 2V_1^2), \end{aligned}$$

где  $\rho$  – равновесная эквивалентная плотность песков с естественной влажностью (определенная экспериментальным путем) или водонасыщенных песков (определенная расчетным путем), кг/м<sup>3</sup>;  $V_1$  – расчетная скорость поперечных волн в зависимости от водосодержания,

$$V_1 = \frac{V}{\sqrt{3}},$$

где  $V$  – измеренная экспериментальным путем скорость продольных волн в образце с естественной влажностью или водонасыщенных песков, полученная расчетным путем, м/с.

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}.$$

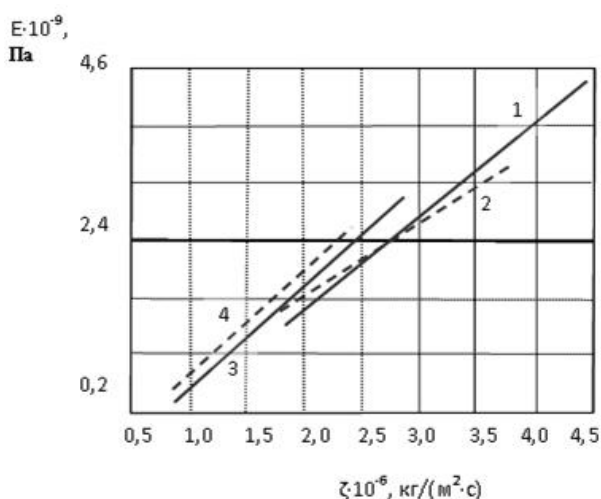
Модуль продольного растяжения  $E$  определен по формуле [5]

На рис. 2 показаны зависимости модуля Юнга  $E$  от равновесного значения волнового сопротивления  $\zeta = \rho \cdot V$  песков при изменении водосодержания образцов на первом и втором участках месторождения руч. Пospelиха.

Полученные в результате экспериментальных исследований и аналитических расчетов данные показали, что пески на исследуемых участках месторождения руч. Пospelиха обладают заметно отличающимися упругими свойствами. По результатам измерений и расчетов природных образцов первого участка месторождения



дения руч. Пospелиха модуль Юнга изменялся от  $1,287 \cdot 10^9$  до  $4,459 \cdot 10^9$  Па, что составляет разницу в 3,5 раза. Разница в изменении модуля Юнга природных образцов второго участка от  $0,263 \cdot 10^9$  до  $2,949 \cdot 10^9$  Па составляет 11,2 раз. Максимальная разница модуля Юнга  $E$  неводонасыщенных образцов обоих участков месторождения составляет 16,9 раз. Разброс значительный. При водонасыщении образцов первого участка месторождения руч. Пospелиха модуль Юнга изменялся от  $1,46 \cdot 10^9$  до  $3,16 \cdot 10^9$  Па, что составляет разницу в 2,1 раза. Разница в изменении модуля Юнга при водонасыщении природных образцов второго участка от  $0,38 \cdot 10^9$  до  $2,46 \cdot 10^9$  Па составила 6,5 раза. Максимальная разница между упругими характеристиками  $E$  водонасыщенных образцов обоих участков месторождения также составляет значительную величину – 8,3 раза. Такой разброс данных не позволяет получить однозначную характеристику интенсивности протекания процесса. Для более точной оценки процесса возникла идея рассчитать динамику изменения упругих характеристик при водонасыщении. Это позволило концептуально обозначить способ управления процессом подготовки к обогащению высокоглинистых песков россыпей с учетом равномерного и оптимального водонасыщения [15].



**Рис. 2. Зависимости модуля упругости  $E$  от равновесного значения волнового сопротивления  $\zeta$  песков месторождения руч. Пospелиха: 1, 3 – при начальной влажности песков от 3,2 до 4,5% на первом участке (1) и от 2,1 до 4,6% на втором участке (3); 2, 4 – при 30% содержании воды в песках на первом участке (2) и на втором участке (4)**

В способе [15], созданном в ИГД ДВО РАН, предлагается перед нарезанием щелей при помощи поперечных или продольных проходов щелерезной установкой, а также затоплением добычного блока водой для дезинтеграции глинистых песков и их последующей отработки, экспериментально-аналитическим путем определить упругие характеристики высокоглинистых песков на сжатие или растяжение на различных участках россыпи. Установить динамику изменения упругих характеристик на этих участках по формуле

$$G = (E^* - E^{**}) / B,$$

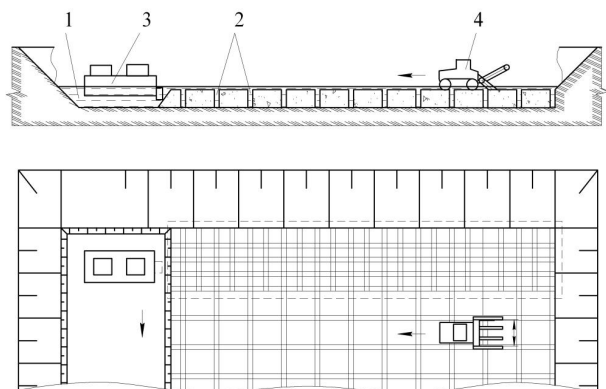
где  $E^*$  – упругая характеристика песков при начальной влажности, Па;  $E^{**}$  – упругая характеристика при повышенном среднем содержании воды в песках, Па;  $B$  – изменение водосодержания в условных единицах по отношению к процентам, т.е. 1% – это 1 единица.

Строится график зависимости динамической характеристики упругости песков  $G$  при водонасыщении на отдельных участках месторождения от относительного волнового сопротивления песков на этих участках:

$$G = f(\zeta^* / \zeta^{**}),$$

где  $\zeta^*$  – волновое сопротивление при начальной влажности песков;  $\zeta^{**}$  – волновое сопротивление при повышенном среднем содержании воды в песках.

Расчет, проведенный по максимальным значениям упругих характеристик обоих участков, показал, что для месторождения руч. Пospелиха динамика изменения данных характеристик при водонасыщении на двух участках отличается в 2,8 раза. На втором участке с самой низкой динамической характеристикой упругости песков при водонасыщении расстояние между щелями уменьшают до величины, обеспечивающей скорость фильтрации и дезинтеграции глинистых песков соразмерно участкам с максимальной динамической характеристикой упругости песков, имеющих максимальное расстояние между щелями. С учетом этого нарезание щелей осуществляют на расстоянии друг от друга в зависимости от изменения динамической характеристики упругости песков при водонасыщении (рис. 3). Для этого в автоматическом режиме осуществляют регулировку расстояния между режущими органами щелерезной установки.



**Рис. 3. Общий вид схемы разработки высокоглинистого месторождения благородных металлов: 1 – канава; 2 – щели; 3 – добычной комплекс; 4 – щелерезная установка**

Способ включает вскрытие обрабатываемых запасов месторождения, проходку канавы на всю длину добычного блока, затопление добычного блока водой для дезинтеграции глинистых песков и их последующую отработку добычным комплексом с установкой напорного гидротранспортирования и обогатительной установкой.

Полученные расчетным путем, в ходе проведенных исследований, данные дают представления о протекании процесса в динамике, что является в большей мере определяющим при водонасыщении труднопровывистых глинистых песков. Требуют своего развития исследования взаимосвязи упругих характеристик песков с процессами разрушения и дезинтеграции для обеспечения снижения технологических потерь ценного компонента.

### Выводы

В результате экспериментальных исследований элементного состава, фазового анализа высокоглинистых песков золотоносного месторождения руч. Поспелиха установлено наличие глинистых минералов монтмориллонитовой группы, а также выявлено преобладание в пробах соединений железа Fe, которое может свидетельствовать о прочных водостойких связях. Это позволяет отнести исследуемый объект к достаточно проблематичному для дезинтеграции и извлечения мелких и тонких частиц ценных компонентов при переработке песков.

Определен расчетным путем характер влияния водонасыщения на упругие характеристики песков на основе изменения зависимостей модуля Юнга E от волнового сопротивления. Установлено, что при водонасыщении образцов первого участка и второго участка месторождения руч. Поспелиха изменения модуля E составляет в первом случае 2,1, а во втором – 6,5 раза. Выполненный расчет динамики изменения упругих характеристик высокоглинистых песков при водонасыщении, в зависимости от относительного волнового сопротивления песков

на участках исследуемого месторождения, выявил характер изменения упругости песков и позволил обосновать способ управления процессом предварительной подготовки массива к более эффективной дезинтеграции.

Следует отметить, что экспериментальные и аналитические исследования в данном направлении требуют дальнейшего развития.

### Список литературы

1. Литвинцев В.С. Обоснование параметров геотехнологии комплексного освоения техногенных месторождений Дальнего Востока: дис. ... д-ра техн. наук. Хабаровск: Институт горного дела ДВО РАН, 2000. 282 с.
2. Проблемы рационального освоения золотороссыпных месторождений Дальнего Востока (геология, добыча, переработка) / Ю.А. Мамаев, А.П. Ван-Ван-Е, А.П. Сорокин, В.С. Литвинцев, А.М. Пуляевский. Владивосток: Дальнаука, 2002. 200 с.
3. Мязин В.П. Повышение эффективности переработки глинистых золотосодержащих песков. Ч. 2. Чита: ЧитГТУ, 1996. 119 с.
4. Использование мощных электромагнитных импульсов в процессах дезинтеграции и вскрытия упорного золотосодержащего сырья / В.А. Чантурия, И.Ж. Бунин, В.Д. Лунин и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2001. № 4. С. 95–105.
5. Новые аспекты научных основ ультразвуковой дезинтеграции высокоглинистых золотосодержащих песков россыпей Приамурья / Н.П. Хрунина, Ю.А. Мамаев, А.М. Пуляевский, О.В. Стратчук; под ред. А.М. Пуляевского. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2011. 167 с. ISBN 978-5-7389-1030-2.
6. Разработка научных принципов и критериев формирования полиметалльных минерально-сырьевых агломераций юга Дальнего Востока как основы прогнозирования рационального развития горнопромышленного комплекса региона. Научное обоснование рационального развития основных горнопромышленных отраслей ДВ региона: отчет о НИР (заключ.) / ИГД ДВО РАН. Хабаровск, 2006. 340 с. ГР № 01.2.00108183.
7. Развитие научных основ и способов геотехнологии освоения рудных, россыпных и угольных месторождений. Разд. 2: Развитие теории и технологий эффективного и экологически безопасного освоения техногенных россыпных месторождений цветных и благородных металлов: отчет о НИР / ИГД ДВО РАН. Хабаровск, 2008. ГР № 01.02.006 13509. Инв. № 02.2.00 950967.
8. Машинский Э.И. Экспериментальные соотношения напряжение-деформация и амплитудная зависимость скоростей волн в осадочных породах // ФТПРПИ. 2003. № 1. С. 10–17.
9. Миренков В.Е. Контактные задачи в механике горных пород // ФТПРПИ. 2007. № 4. С. 36–48.
10. Миренков В. Е. О возможности разрушения подработанных пород в массиве // ФТПРПИ. 2009. № 2. С. 10–17.
11. Миронов, В.А., Софьин О.Е. Основные уравнения прочности и деформируемости дисперсных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. Тематическое приложение: Дальний Восток. С. 64–72.
12. Khrunina N.P., Korneeva S.I. Improving mining methods of high-clay deposits of precious metals // Eurasian mining. 2014. №1. P. 15–17.
13. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Изд-во АН СССР, 1952.
14. Мязин В.П. Физико-химические методы интенсификации процессов первичной добычи и переработки глинистых золотосодержащих песков: авторефер. дис. ... д-ра техн. наук / В.П. Мязин. М.: МГРИ, 1987. 28 с.
15. Пат. 2537460 РФ, МПК E21C41/30, E21C45/00. Способ разработки глинистых месторождений полезных ископаемых / Хрунина Н.П., Чебан А.Ю. № 2013147614; заявл. 24.10.2013; опубл. 10.01.2015, Бюл. №1.

## INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

## ASSESSMENT OF THE EFFECT OF WATER SATURATION ON DISINTEGRATION OF SANDS WITH HIGH CLAY CONTENT WHEN MINING PRECIOUS METAL PLACERS

**Khrunina Natalia Petrovna** – Senior researcher, Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences (DVO RAN IGD), Khabarovsk, Russia. Phone: +7 (4212)- 32-79-27. E-mail: npetx@mail.ru.

**Cheban Anton Yurievich** – Senior researcher, Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences (DVO RAN IGD), Khabarovsk, Russia. Phone: +7 (4212)- 32-79-27. E-mail: chebanay@mail.ru.

**Abstract.** The article deals with the results of exploration of precious metal placer sands with high clay content in Pospelihka settlement, Primorsky Krai. Sands of the gold placers under study have proved to be difficult to disintegrate because of iron oxides and clay minerals of a montmorillonit group. The behaviour of elastic characteristics of the sands under water saturation conditions has been determined with the help of experimental analysis. The article presents data on the water saturation effect on difficult-to-wash clay sands to ensure further desintegration. The authors propose an assessment of the water-saturation effect at high-clay sands mining based on the elasticity dynamics calculation. The article considers a method of the sand-desintegration preparation control allowing for the proposed dynamic sand characteristics under water saturation conditions. The authors note that exploration of this area of focus, including pilot and analytical studies, requires further development.

**Keywords:** Water saturation, elemental composition, phase analysis, wave impedance, disintegration, ultrasound speed, longitudinal tensile module, elasticity dynamics.

## References

- Litvintsev V.S. *Obosnovanie parametrov geotekhnologii kompleksnogo osvoeniya tekhnogennykh mestorozhdenij Dal'nego Vostoka: dissertatsiya doktora tekhnicheskikh nauk* [Justification of geotechnology parameters of a comprehensive development of technogene deposits in the Far East. D.Sc. dissertation]. Khabarovsk: Mining Institute, FEB RAS, 2000, 282 p.
- Mamaev Yu.A., Van-Van-E A.P., Sorokin A.P., Litvintsev V.S., Pulyevsky A.M. *Problemy ratsional'nogo osvoeniya zolotorosсыnykh mestorozhdenij Dal'nego Vostoka (geologiya, dobycha, pererabotka)* [Issues of sustainable development of gold placers in the Far East (Geology, mining, processing)]. Vladivostok: Dalnauka, 2002, 200 p.
- Myazin V.P. *Povyshenie ehffektivnosti pererabotki glinistykh zolotosoderzhashhikh peskov. Chast' 2* [Improving the efficiency of clay gold-bearing sands processing. Part 2]. Chita: ChitGTU, 1996, 119 p.
- Chanturia V.A., Bunin I.Zh., Lunin V.D. and others. Use of powerful electromagnetic pulses in disintegration processes and stripping of hard gold raw materials. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and technical issues of mineral resources development]. 2001, no 4, pp. 95–105.
- Khrunina N.P., Mamaev Y.A., Pulyevsky A.M., Stratechuk O.V.; Edited by A.M. Pulyevsky. *Novye aspekty nauchnykh osnov ul'trazvukovoj dezintegratsii vysokoglinistykh zolotosoderzhashhikh peskov rossypej Priamur'ya* [New aspects of the scientific basics of ultrasonic disintegration of the Amur high-clay gold placer sands]. Khabarovsk: Publishing House Pacific. Gos. Un-ty, 2011. 164 p. ISBN 978-5-7389-1030-2.
- Development of scientific principles and criteria of polymetal mineral agglomeration formation in the Southern Far East as a basis for forecasting the rational development of the regional mining complex. Scientific justification of the rational development of the main Far-Eastern mining industries: research report (concl.) / The Mining Institute of the Far-Eastern Department of the Russian Academy of Sciences. Khabarovsk, 2006, 340 p. No. 01.2.00108183.
- Development of scientific basics and methods of the geotechnology of ore, gravel and coal deposits development. Section 2: Development of a theory and technologies of efficient and environment-friendly development of man-made non-ferrous and precious metal placer deposits: research report / The Mining Institute of the Far-Eastern Department of the Russian Academy of Sciences. Khabarovsk. 2008, no. 01.02.006 13509. Inv. No. 02.2.00 950967.
- Mashinskiy E.I. Experimental stress-strain relations and amplitude dependence of wave velocities in sedimentary rocks. *Physical and technical issues of minerals development*, 2003, no. 1, pp. 10-17.
- Mirenkov V.E. Contact problems in rock mechanics. *Physical and technical issues of minerals development*, 2007, no. 4, pp. 36-48.
- Mirenkov V.E. On the possibility of destruction of underworked rocks in massifs. *Physical and technical issues of minerals development*, 2009, no. 2, pp. 10-17.
- Mironov V.A., Sofin O.E. Basic equations of strength and deformability of dispersed rocks. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten'* [Mining information-analytical bulletin]. 2005. Topical application: Far East. pp. 64-72.
- Khrunina N.P., Korneeva S.I. Improving mining methods of high-clay deposits of precious metals. *Evrasijskij dobycha* [Eurasian mining]. 2014, no. 1, pp. 15-17.
- Levich V.G. *Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika* [Physical and chemical hydrodynamics]. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1952.
- Myazin V.P. Physical and chemical stimulation methods of primary clay gold-bearing sands mining and processing: D.Sc. in Engineering, V.P. Myazin's extended abstract of a dissertation. Moscow: Moscow Exploration Institute, 1987, 28 p.
- Khrunina N.P., Cheban A.Yu. Development of clay minerals deposits. Patent RF, no. 2537460, 2015.

Хрунина Н.П., Чебан А.Ю. Оценка влияния водонасыщения на дезинтеграцию высокоглинистых песков при разработке россыпей благородных металлов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 50–55.

Khrunina N.P., Cheban A.Yu. Assessment of the effect of water saturation on disintegration of sands with high clay content when mining precious metal placers. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 50–55.

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ОПОЛЗНЕОПАСНЫЙ УЧАСТОК АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ В РАЙОНЕ г. СОЧИ

Еркушов В.Ю., Кононенко В.Н.

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

**Аннотация.** В ходе данного исследования было рассмотрено влияние динамической нагрузки и вибрационного воздействия от строительных механизмов и автомобильного транспорта на оползневые склоны и слагающих их грунты. Для изучения влияния динамического воздействия использовались геофизические методы исследования и расчетные методики, основанные на скоростях продольных и поперечных волн и упругих свойствах горных пород. Проведенные вычисления позволили нам получить величины напряжений, возникающих в грунтах в результате воздействия, и значения собственных частот грунтов, слагающих оползневые склоны. Полученные результаты математических расчетов основываются на работах множества ученых, занимавшихся вопросом влияния динамических нагрузок на грунты. В результате, после анализа материалов геофизических исследований и данных математических расчетов, в грунтовой толще были выделены слои, в которых значения собственных частот совпадают со значениями частоты вибрационного воздействия.

**Ключевые слова:** оползневые склоны, оползневые тела, вибрационное воздействие, напряжения в грунте, коэффициент устойчивости склона.

### Введение

Динамические воздействия связаны с вибрацией вследствие действия машин и механизмов, особенно с неуравновешенными вращающимися частями, с ударными воздействиями, со взрывами, с перемещающимся транспортом, с сейсмическим воздействием, действием фильтрационных потоков и др. Динамические воздействия можно подразделить на слабые, которые могут часто действовать относительно длительное время, и сильные, которые могут действовать и кратковременно, возможно даже однократно (удар, взрыв). По времени действия усилия подразделяются на длительно действующие и кратковременные. С практической точки зрения наиболее значимы динамические нагрузки от движущегося транспорта в связи с высокой интенсивностью и широким распространением, особенно на городской территории г. Сочи и новых строящихся автодорог с почти непрерывным транспортным потоком.

Установлено, что в пределах района г. Сочи свежими, относительно молодыми, оползнями занято около 35%, а в некоторых районах предгорий до 55% [5]. Не вызывает сомнения, что на такую пораженность оползневыми процессами повлияла различная антропогенная деятельность, включающая в себя динамическое воздействие на оползнеопасные склоны во время строительства различных объектов. На склонах имеется большое коли-

чество старых оползней, образовавшихся в голоценовый период, отличавшийся по сравнению с современным более активным тектоническим режимом, более молодым рельефом и, как следствие этого, более интенсивным развитием оползневых процессов. Поэтому оползни захватывали не только переработанные выветриванием, но и материнские породы палеогенового возраста.

### Механизм вибрационного воздействия

Вибрация во время динамических воздействий уменьшает силы междучастичного трения и сопротивление сдвигу. Сильные импульсные воздействия могут вызвать дополнительные осадки и просадки. При определенной частоте колебаний, близкой к резонансной, междучастичное трение в сыпучих грунтах может настолько уменьшиться, что грунт приобретает свойства вязкой жидкости даже при малом количестве воды в нем. При наличии большого количества воды в грунте она может не успеть покинуть поры, в которых находилась, поэтому возникает поровое противодавление, уменьшающее сопротивление сдвигу. При динамических воздействиях в основном уменьшаются межчастичные силы трения, а в меньшей степени уменьшается угол внутреннего трения. Угол внутреннего трения будет уменьшаться вследствие разрыхления грунта, то есть увеличения его пористости.

Сотрясение грунта, обусловленное движением транспорта, обычно значительно слабее сей-



смических воздействий. Однако в связи с длительностью действия этих нагрузок и большой интенсивностью они могут служить причиной развития незатухающих осадок и даже вибротекучести грунтов. Техногенные динамические нагрузки распространяются главным образом в верхней части грунтовой толщи до глубин 10-15 м, так как основная часть их энергий переносится к сооружениям поверхностными волнами Релея, быстро затухающим с глубиной [3]. Именно в пределах этих глубин находится большинство поверхностей скольжения оползневых тел, распространенных в г. Сочи.

### Получение значений собственных частот грунтов

В ходе геофизических исследований обхода г. Сочи были получены не только скорости продольных и поперечных сейсмических волн методом МПВ, но и зафиксированы частоты вибрационного воздействия от автотранспорта на участке изысканий. На **рис. 1** представлена сейсмограмма вибрационного воздействия, зафиксированного на поверхности грунта. На **рис. 2 и 3** – скоростной разрез продольных и поперечных волн, с помощью которого грунтовая толща разделена на слои.

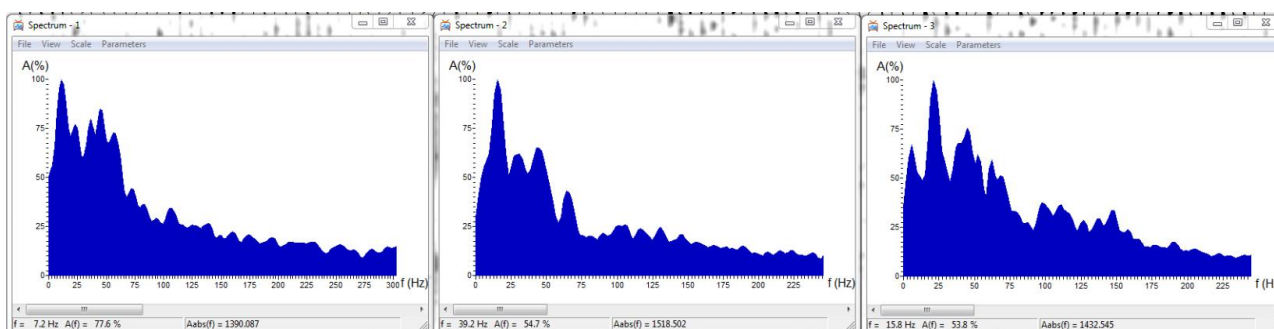


Рис. 1. Сейсмограмма вибрационного воздействия на поверхности грунта

### Скоростной разрез продольных волн (м/с)

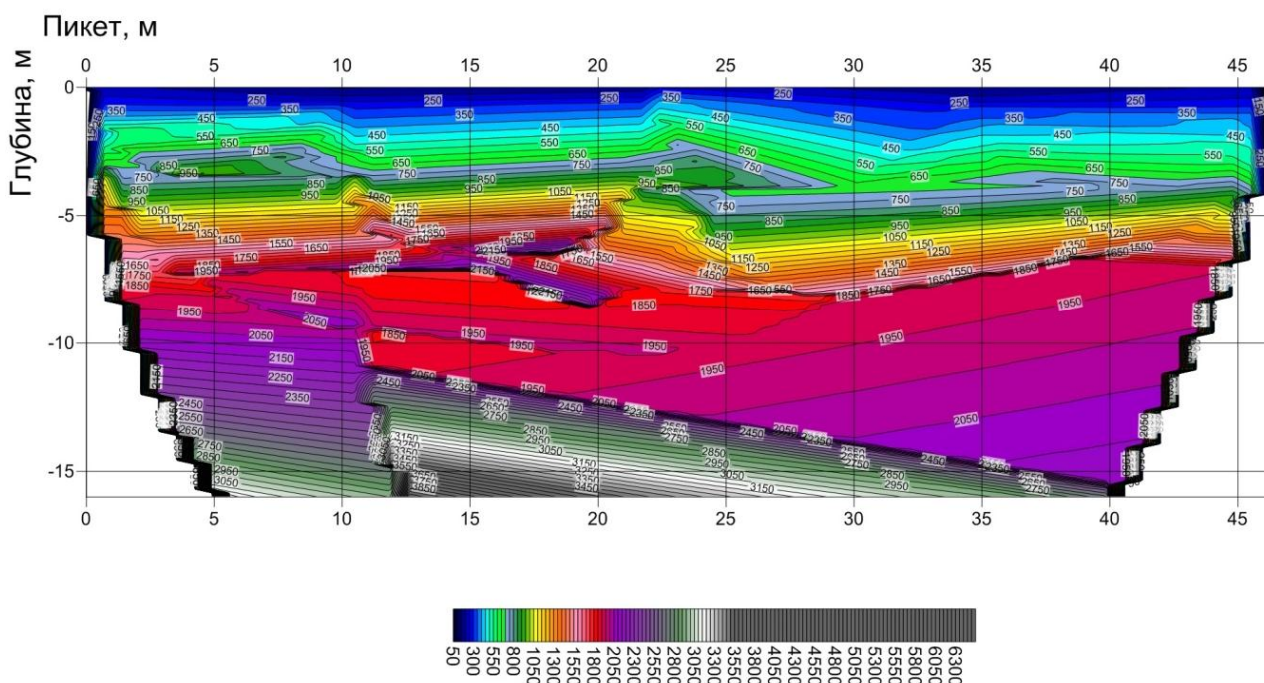
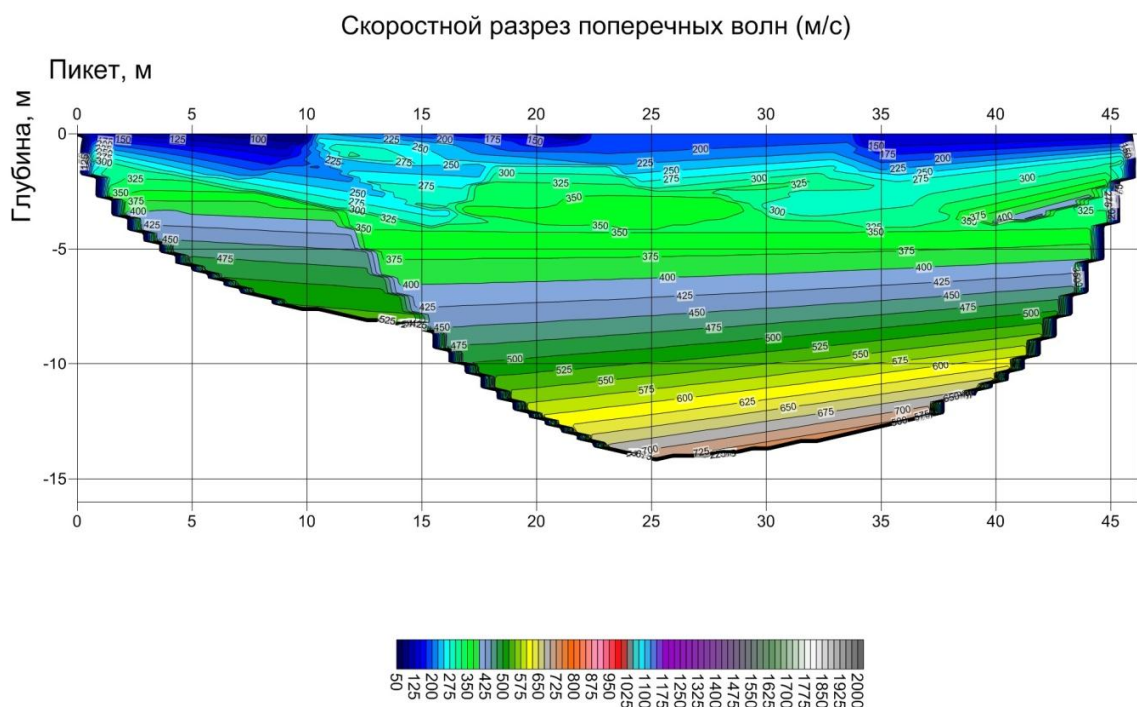


Рис. 2. Скоростной разрез продольных волн



**Рис. 3. Скоростной разрез поперечных волн**

**Методика расчета собственных частот грунтов**

Амплитудный уровень и частота резонансных пиков зависят от упругих свойств и мощностей слоев горных пород, способных к усилению сейсмических волн. К числу подобных грунтов относятся любые достаточно рыхлые породы, обладающие скоростью распространения поперечных волн ( $V_s$ ) ниже 700 м/с [4].

Существует простое приближительное выражение, связывающее собственный период горизонтальных и вертикальных колебаний грунта со скоростными параметрами разреза:

$$T_H = 4H / V_s, \tag{1}$$

где  $T_H$  – горизонтальные частоты грунтов;  $H$  – глубина залегания рассматриваемой границы;  $V_s$  – скорость поперечных волн на глубине залегания рассматриваемой границы.

$$T_V = T_H * ((2 * (1 - \mu) / (1 - 2 * \mu))^{-2}), \tag{2}$$

где  $T_V$  – вертикальные частоты грунтов;  $T_H$  – горизонтальные частоты грунтов;  $\mu$  – коэффициент Пуассона на глубине залегания грунтов.

По данным, полученным в ходе геофизических исследований при использовании данных выражений собственно разработанного математического расчета и программного комплекса Surfet, были получены собственные частоты грунтов, представленные в **таблице** и на **рис. 4 и 5**.

После анализа сейсмограммы были выделены частоты с наибольшей и наименьшей амплитудой и силой воздействия. Наибольшее воздействие оказывают промежутки частот 10–13 Гц. Наименьшая амплитуда зафиксирована в участках 30–37 и 60–70 Гц.

**Грунты, выявленные в результате геофизических изысканий и их собственные частоты**

Номер слоя	Глубина подошвы, м	Характеристика слоя грунта	Собственная частота, Гц
1	1,5	Насыпной грунт с суглинистым заполнителем. Заполнитель желто-коричневый, легкий, песчанистый, полутвердый с включением щебня и дресвы до 20%	60–100
2	6	Глина желто-бурая, легкая пылеватая полутвердая с включением щебня (до 15-20 см) и глыб до 50 см осадочных пород. Щебня до 15%, глыб до 3%	18–30
3	13	Аргиллит темно-серый, сильно выветрелый до состояния глины с дресвой и щебнем до 30%. Глина темно-серая тугопластичная, легкая, щебенистая	13–18
4	15	Аргиллит серый, низкой прочности, сильнотрещиноватый, плотный, размягчаемый, нерастворимый	>13

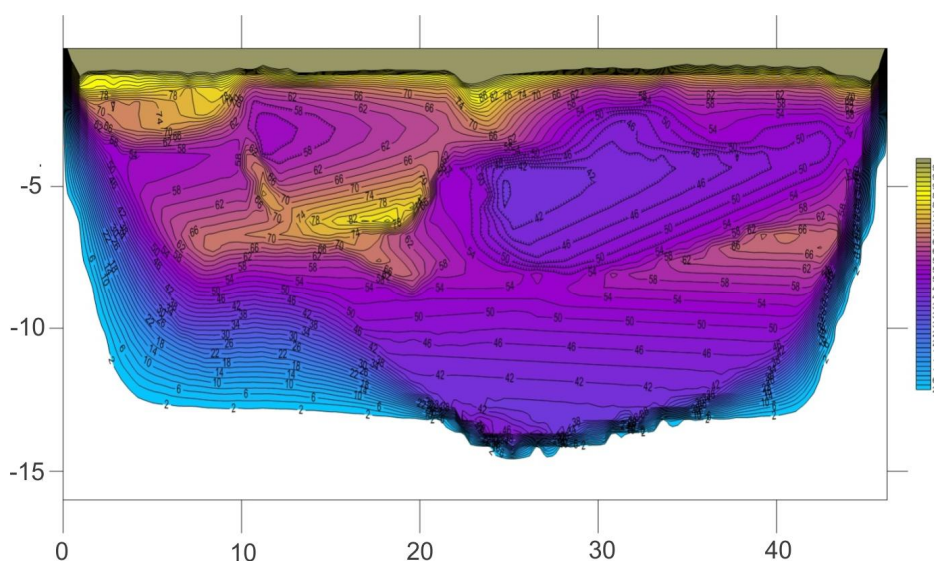


Рис. 4. Разрез собственных вертикальных частот грунтов

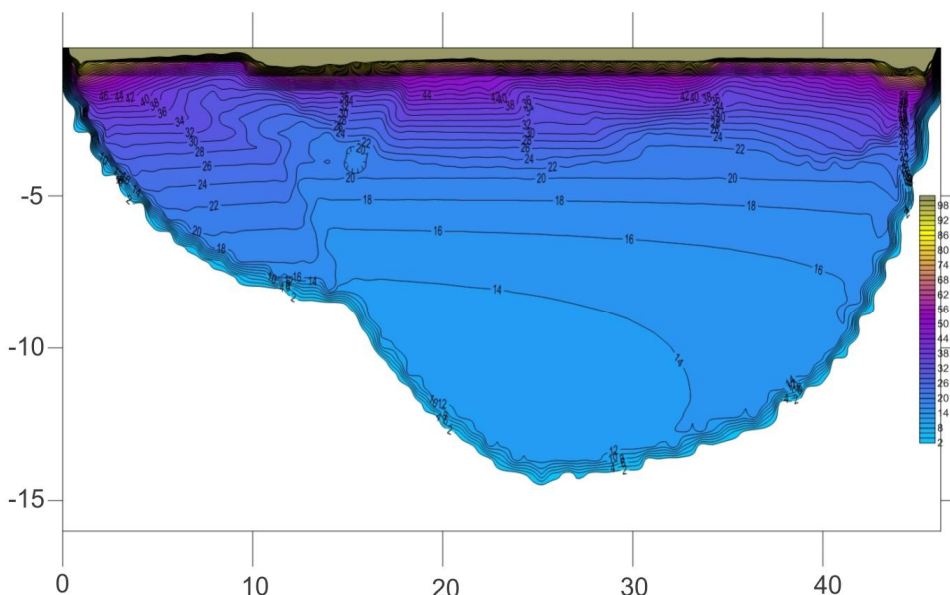


Рис. 5. Разрез собственных горизонтальных частот грунтов

### Вывод

Сравнивая частоты собственных колебаний грунтов и промежутки частот с максимальной и минимальной амплитудой, можно сделать вывод, что частоты второго промежутка с максимальной амплитудой могут войти в резонанс с частотами слоя №4 и вызвать внутри него необратимые разрушения. Вибрационное воздействие на слои №1, 2 и 3 незначительно, и маловероятно возникновение резонанса в данных грунтах и ухудшение коэффициента устойчивости склона.

Как видно из расчетов, роль вибрационного воздействия в возникновении и развитии оползневых процессов значительна. Установлено, что при

сотрясениях в оползнеопасном массиве возникают колебания, вызывающие разуплотнение глинистых отложений, отслоение пород массива и формирование новых поверхностей скольжения. Так как вибрационное воздействие на поверхность в районе г. Сочи присутствует практически повсеместно в связи с строительным бумом и основное количество оползневых тел находится в предельном состоянии, расчет устойчивости склонов следует вести с учетом вибрационного воздействия.

### Список литературы

1. Волков Е. А., Третьякова П. А., Шутова О. А. Анализ результатов тестового эксперимента по исследованию вибраций, создаваемой автотранспортом на территории города // Вест-



- ник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2011. вып. 4. С. 15–20.
2. Дедова Е. В. О видах остаточных деформаций грунтов, проявляющихся при землетрясениях // Вопросы инженерной сейсмологии. 1965. Вып. 10. С. 119–131.
  3. Дудкин Е. С. Динамические воздействия от движения городского транспорта на здания и сооружения // Ползуновский вестник. 2007. Вып. 1–2. С. 30–32.
  4. Исичко Е. С. Резонансные свойства грунтов и зданий, их учет при строительстве // Бюллетень индустрии геофизики и геологии АСМ, 2005. Вып 1. С. 12–20.
  5. Клименко А. И. Роль современных сейсмотектонических факторов в оползневом процессе // Проблемы инженерной геологии Северного Кавказа. 1986. Вып. 5. С. 37–43.
  6. Медведев С. В. Инженерная сейсмология. М.: Госстройиздат, 1962.
  7. Novak M., Sheta M. Dynamic response of piles and pile groups. Proceedings, 2nd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling, Austin Texas (1982). P. 489–507.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

IMPACT OF DYNAMIC LOADS ON THE LANDSLIDE-PRONE MOTORWAY SECTION NEAR SOCHI

**Erkushov Vladislav Yurevich** – Postgraduate Student, Junior research, Kuban State University of Technology, Krasnodar, Russia. E-mail: v.erkushov@gmail.com.

**Kononenko Vladimir Nikolaevich** – Ph.D. (Eng.), Senior research fellow, Kuban State University of Technology, Krasnodar, Russia. E-mail: kvn54@mail.ru.

**Abstract.** The article considers the impact of dynamic loads and vibration exposure from construction machinery and motor transport on landslide slopes and soils composing them. To study the effect of dynamic exposure, we applied geophysical research methods and computational techniques based on longitudinal and transverse wave velocities and elastic properties of rocks. These calculations allowed us to arrive at values of stresses occurring in soils by exposure and values of natural frequencies of landslide slope soils. The mathematical calculation results are based on works of many researchers who dealt with impacts of dynamic loads on the ground. As a result, layers, where natural frequencies coincide with vibration exposure frequencies, have been identified after the materials of geophysical studies and mathematical calculations were analyzed.

**Keywords:** Landslide slopes, landslide body, vibration exposure, stress in the soil, slope stability factor.

References

1. Volkov E.A., Tretiakov P.A., Shutova O. A. Analysis of results of an experiment on vibration produced by motor transport within the city. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Vestnik of the Perm National Research Technical University. Construction and architecture], 2011, no. 4, pp. 15-20.
2. Dedova E. V. Types of residual ground deformations appearing during earthquakes. *Voprosy inzhenernoy seysmologii* [Engineering seismology issues], 1965, no. 10, pp. 119-131.
3. Dudkin E. S. Dynamic impacts of urban transport circulation on buildings and constructions. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovsky vestnik], 2007, no. 1-2, pp. 30-32.
4. Isichko Ye. S. Resonance frequency behaviour of grounds and buildings, taking it into account for construction. *Byulleten' industrii geofiziki i geologii ASM* [ASM geophysics and geology newsletter], 2005, no. 1, pp. 12-20.
5. Klimenko A. I. Role of modern seismic and technical factors in a landslide process. [North Caucasian engineering geology issues], 1985, no. 5, pp. 37-43.
6. Medvedev S.V. *Inzhenernaya seysmologiya* [Engineering seismology]. Moscow, 1962.
7. Novak M., Sheta M. Dynamic response of piles and pile groups. Proceedings, 2nd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling, Austin Texas (1982), pp. 489-507.

Еркушов В.Ю., Кононенко В.Н. Воздействие динамической нагрузки на оползнеопасный участок автомобильной дороги в районе г. Сочи // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 56–60.

Erkushov V.Yu., Kononenko V.N. Impact of dynamic loads on the landslide-prone motorway section near Sochi. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 56–60.



# ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.74.041:669.15

## ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВКИ «ЗУБ КОВША ЭКСКАВАТОРА»\*

Колокольцев В.М., Вдовин К.Н., Сеницкий Е.В., Феоктистов Н.А.

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

**Аннотация.** В работе проведен анализ эксплуатационной стойкости отливки «Зуб ковша экскаватора». Показано, что износ зуба ковша экскаватора происходит преимущественно по двум механизмам – это микрорезание при абразивном воздействии грунтов и усталостное разрушение в результате циклического воздействия при ударно-абразивном износе. Проведено моделирование условий формирования отливки, выявлены зоны с повышенной вероятностью образования литейных дефектов в виде скрытых усадочных раковин, микропористости и ликвации. Показано, что для дальнейшего повышения эксплуатационных характеристик необходим комплексный подход с изменением конструкции детали, совершенствования литейной технологии и дополнительном легировании и модифицировании стали.

**Ключевые слова:** сталь Гадфильда, зуб ковша, моделирование, абразивный износ, ударно-абразивный износ, литейная технология, литейная форма.

### Введение

Базой интенсификации современных производств и сокращения издержек предприятий может являться повышение требований в аспекте эксплуатационной стойкости деталей, узлов и агрегатов. Это напрямую связано с необходимостью повышения качества литых деталей и увеличением срока их службы. Это наиболее характерно для отливок, предназначенных для работы в условиях воздействия интенсивных нагрузок, агрессивных и абразивных сред. Примером может служить отливка «Зуб ковша экскаватора».

### Основная часть

Для повышения стойкости зуба ковша экскаватора можно выделить три направления работы:

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

Первое направление отличается длительным циклом разработки сплава нового состава и

внедрением его в производство. Также следует отметить, что высокие свойства достигаются при создании высоко- и комплексно-легированных сплавов. Подобные сплавы обладают высокой ценой, сложностью в производстве, специальными требованиями к технологическому и обрабатываемому оборудованию.

Изменение конструкции (конфигурации) зуба ковша путем моделирования условий их работы и оценки областей интенсивного разрушения (рис. 1) для многих типов заготовок уже выполнено. Кроме того, интенсивность разрушения зависит в большой степени от типа грунтов и кинематики движения ковша экскаватора. Полный износ зубьев, как отмечал Ю.А. Ветров, происходит после выработки 30–35 тыс. м<sup>3</sup> песчано-щебеночных грунтов. При этом угол заострения зуба увеличивается в 2–2,5 раза, достигая 65–70° вместо 26° у нового зуба, а рабочая длина уменьшается в 3–4 раза (рис. 1, 2) [1].

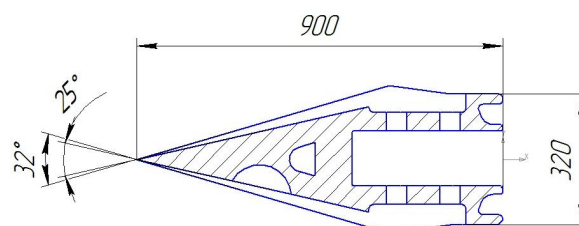
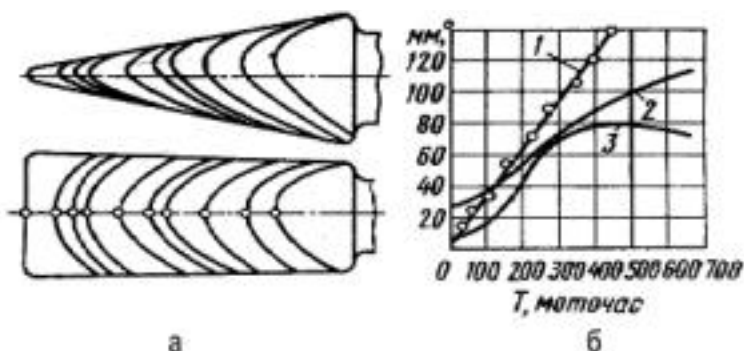


Рис. 1. Зуб ковша экскаватора

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта №15-19-10020.

© Колокольцев В.М., Вдовин К.Н., Сеницкий Е.В., Феоктистов Н.А., 2015



**Рис. 2. Износ зуба ковша экскаватора (а) и изменение его параметров (б): 1 – длина; 2 – угол заострения; 3 – длина площадки износа**

Значительный вклад в долговечность и надёжность литых деталей в процессе эксплуатации вносит технология производства отливки. При создании литейных технологий необходимо учитывать рациональное и оптимальное использование материалов и энергии.

Это касается и технологии изготовления литых изделий из высокомарганцевистой стали 110Г13Л (сталь Гадфильда). Большинство отливок из марганцевистой стали работают в условиях интенсивного ударно-абразивного износа в различных агрегатах и установках горно-металлургического комплекса. Износ зуба ковша экскаватора происходит преимущественно по двум механизмам – это микрорезание при абразивном воздействии грунтов и усталостное разрушение в результате циклического воздействия при ударно-абразивном износе. Этот вывод подтверждает характер поверхности износа: нижняя часть зуба имеет зоны с явно направленным рельефом износа, а верхняя часть зоны – с матовым рельефом и без выраженного направления. Характер износа в большей степени зависит от угла атаки абразивной среды – при увеличении угла атаки абразивный износ происходит в большей мере по усталостному типу.

Марганцевистые стали отличаются трудностями и особенностями её литья, которые необходимо учитывать при разработке литейных технологий [2, 3]. Преимущество стали 110Г13Л связано с её способностью к упрочнению поверхности путем наклёпа при воздействии внешних нагрузок [3]. В процессе работы при высоких контактных нагрузках в образцах стали зуба и выявляется аустенит с частичным мартенситным превращением. В зонах с явно выраженным абразивным износом по механизму микрорезания преобладает деформированный аустенит с незначительным мартенситом [4, 5]. В зонах с преобладающим усталостным выкашиванием в структуре пре-

обладает мартенсит со следами хрупкого разрушения.

Повышение требований к надёжности оборудования, которая определяется эксплуатационной стойкостью, приводит к необходимости комплексного подхода к рассматриваемым вопросам. Часто эксплуатационная стойкость запасных (сменных, расходных) частей, получаемых от производителей, колеблется в широких интервалах (табл. 1). В процессе эксплуатации зубьев ковша экскаватора из стали марки 110Г13Л фиксировалось количество породы до наступления момента критического изнашивания.

**Таблица 1  
Стойкость зуба ковша экскаватора одного производителя**

Экскаватор	Средняя стойкость, т
18	27651
37	26850
38	15940
52	24411
101	27882
102	39680
103	25059
104	23963
105	33311
106	23368
107	20557
108	33059
109	26099

Анализ данных показал, что для эксплуатации в «стандартных» условиях возможно изменение стойкости в более чем 2 раза. Так, для экскаватора № 102 минимальная стойкость составила 14414 т, а максимальная – 40409 т. Подобная картина наблюдается для всех экскаваторов, а средняя стойкость отличается в 2,49 раза.

При сравнении стойкости зуба ковша экскаваторов, работающих в одинаковых условиях, от разных производителей также выявлено существенное различие эксплуатационной стойкости (табл. 2).

**Таблица 2  
Стойкость зуба ковша экскаватора разных производителей**

№	Экскаватор	Стойкость, т	Примечание
1	38	16946	производитель 1
2		11179	производитель 1
3		20282	производитель 1
4		15350	производитель 1
5		7311	производитель 2
6		8354	производитель 2
7		8997	производитель 2
8	107	20557	производитель 1
9		4529	производитель 2

Технологический процесс производства зуба ковша экскаватора в условиях различных производств представляет собой формовку в песчано-глинистых смесях, отверстия и полости формируются при помощи стержней из холоднотвердеющих смесей, применяются боковые прибыли (рис. 3).

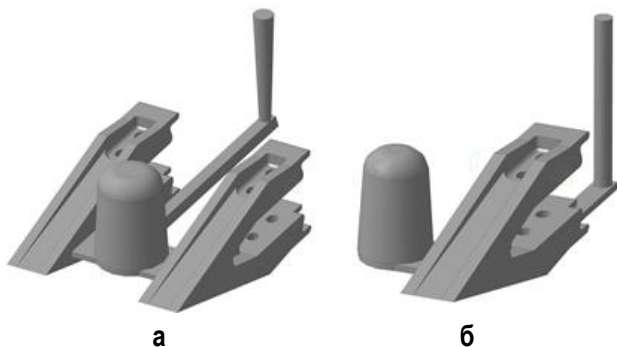


Рис. 3. Отливка «Зуб ковша»: а – вариант 1; б – вариант 2

После вывода зубов ковша из эксплуатации установлено, что отличие в эксплуатационной стойкости в большей степени определяется наличием скрытых усадочных дефектов, микропористости и ликвации снижающих эксплуатационную стойкость. При проведении компьютерного моделирования разных технологий изготовления отливки «Зуб ковша» выявили зоны с повышенной вероятностью образования литейных дефектов в виде скрытых усадочных раковин, микропористости и ликвации (рис. 4).

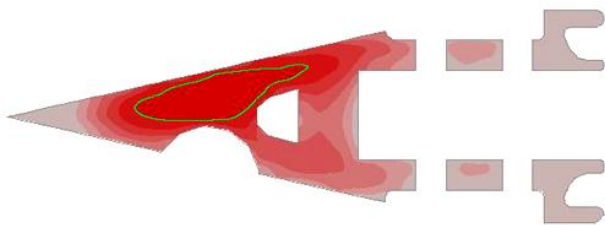


Рис. 4. Зоны возможных дефектов отливки «Зуб ковша»

## Заключение

Применяемая при производстве отливки «Зуб ковша» литейная технология оказывает существенное влияние на формирование макро- и микроструктуры сплава, определяет наличие дефектов, таких как скрытые усадочные раковины, пористость, ликвация. Указанные факторы приводят к изменению эксплуатационной стойкости отливок до двух и более раз. В современных условиях применение моделирования и оптимизации литейных технологий позволяет существенно повысить конкурентоспособность продукции за счет снижения издержек, потерь и повышения эксплуатационных характеристик отливок. Для комплексного повышения эксплуатационных свойств отливки «Зуб ковша» необходим комплексный подход с изменением конструкции детали, совершенствованием литейной технологии и дополнительным легированием и модифицированием стали 110Г13Л с целью повышения ее прочностных и износостойких характеристик.

## Список литературы

1. Ветров Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами. М.: Машиностроение, 1971. 360 с.
2. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Хабибуллин Ш.М. Совершенствование технологии производства литых броней из стали марки 110Г13Л для мельницы МПСИ-70×23 // Литейщик России. 2014. №1. С. 13–15.
3. Производство стальных отливок: учебник для вузов / В.М. Колокольцев, Л.Я. Козлов, К.Н. Вдовин и др. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2011. 352 с.
4. Абразивная износостойкость литых металлов и сплавов / Колокольцев В.М., Мулявко Н.М., Вдовин К.Н., Синецкий Е.В.; под ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 228 с.
5. Колокольцев В.М., Долгополова Л.Б., Мулявко Н.М. Взаимосвязь химического состава, структуры и свойств хромомарганцовых аустинитных сталей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2004. № 2. С. 12–15.

## INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

### EVALUATION OF SERVICE DURABILITY AND SIMULATION OF A TECHNOLOGY OF "EXCAVATOR BUCKET TOOTH" CASTING

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

**Vdovin Konstantin Nikolaevich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-30. E-mail: Vdovin@magtu.ru.

**Sinitsky Evgeny Valerievich** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-30.

**Feoktistov Nikolay Aleksandrovich** – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-30.

**Abstract.** The article deals with the analysis of service durability of "excavator bucket tooth" casting. The authors show that excavator bucket tooth wear mainly occurs in two manners - microcutting when exposed to abrasive soils and fatigue failure by cyclical exposure to impact-abrasive wear. Casting forming has been simulated. Areas prone to formation of casting defects in the form of hidden cavities, microporosity and segregation have been identified. The authors also show that further performance improvement requires an integrated approach including detail design modification, improvement of casting technology and additional alloying and modification of steel.

**Keywords:** Hadfield steel, bucket tooth, simulation, abrasion, impact abrasion, casting technology, casting mold.

## References

1. Vetrov Y. *Rezanie gruntov zemlerojnymi mashinami* [Digging

Оценка эксплуатационной стойкости и моделирование технологии изготовления отливки «Зуб ковша экскаватора» / Колокольцев В.М., Вдовин К.Н., Синицкий Е.В., Феоктистов Н.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 61–64.

Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Sinitsky E.V., Feoktistov N.A. Evaluation of service durability and simulation of a technology of "Excavator bucket tooth" casting. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 61–64.

with earthmoving machines]. Moscow: Mechanical Engineering, 1971. 360 p.

2. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Khabibullin S.H. Improvement of production technology of 110G13L steel armor castings for 70×23 SAG mill. *Litejshhik Rossii* [Foundryman of Russia]. 2014, no. 1, pp. 13-15.
3. Kolokoltsev V.M., Kozlov L.Y., Vdovin K.N. and colleagues. *Proizvodstvo stal'nykh otlivok: uchebnik dlya vuzov* [Production of steel castings: Textbook for university students]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011, 352 p.
4. Kolokoltsev V.M., Muliavko N.M., Vdovin K.N., Sinitsky E.V. Abrasive wear resistance of cast metals and alloys. Ed. V.M. Kolokoltsev. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2004. 228 p.
5. Kolokoltsev V.M., Dolgopolov L.B., Muliavko N.M. Interrelation of chemical composition, structure and properties of austenite chrome-manganese steels. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2004, no. 2, pp. 12-15.

УДК 621.74

## РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВНЕДРЕНИИ АСИММЕТРИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАТРУДНЕНИЯ ЛИТОЙ ДЕТАЛИ В СЛОЙ ФОРМОВОЧНОЙ СМЕСИ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ

Савинов А.С.

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

**Аннотация.** В работе рассмотрен вопрос возникновения усадочных напряжений упруго-пластического деформирования отливки «Шлаковая чаша», приводящего к нарушению сплошности в стенке отливки и образованию дефекта «горячая трещина». Создана математическая модель и по предложенным автором алгоритмам произведен расчет силового взаимодействия отливки и формы. Определены количественные показатели полного напряженного состояния в стенке отливки в момент образования трещины. Установлено, что наибольшее влияние на образование дефекта оказывает напряжение изгиба, составляющее 96% от значения предела прочности материала отливки. По результатам работы предложены технологические приемы, направленные на уменьшение вероятности образования горячих трещин в теле отливки.

**Ключевые слова:** отливка, горячая трещина, «Шлаковая чаша», упруго-пластическое деформирование, напряжение изгиба.

### Введение

Образование горячей трещины в теле отливки является следствием взаимовлияния различных видов внутренних сил, образующихся под воздействием усадочных процессов при силовом взаимодействии отливки и формы. При этом зачастую какой-то из компонентов напряженного состояния играет более значительную роль, а следовательно, технологическим воздействием на выборочный, наиболее значимый, компонент возможно избежание брака по горячим трещинам в литье. Это в полной мере относится к крупногабаритному стальному литью, одним из представителей которого является «Шлаковая чаша» (рис. 1).

© Савинов А.С., 2015



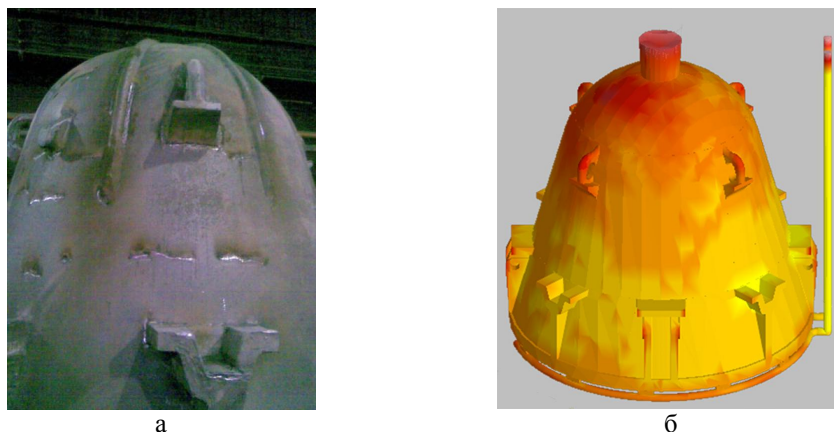


Рис. 1. Отливка «Шлаковая чаша»: а – горячие трещины на поверхности отливки; б – цветовая интерпретация температурного поля на поверхности отливки

**Основная часть**

При рассмотрении напряженно-деформированного состояния отливки «Шлаковая чаша» одним из составляющих внутренних сил являются изгибные моменты, появляющиеся вследствие внедрения асимметричных элементов затруднения в слой смеси переменной жесткости.

В источнике [1] показано выражение изгибного момента, описывающего его как (рис. 2):

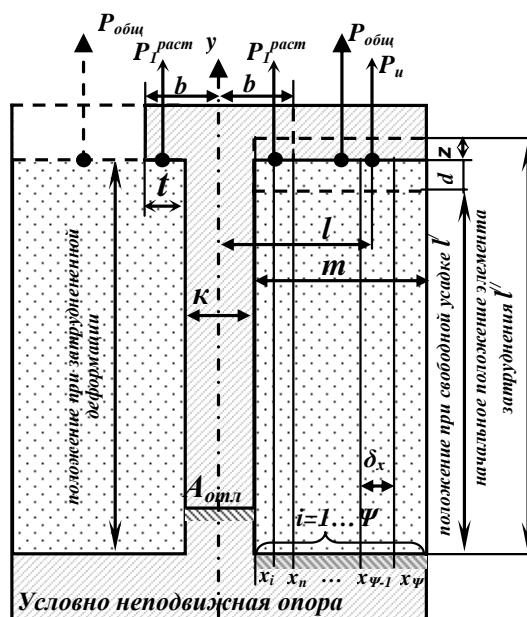


Рис. 2. Схема к расчету деформации системы «отливка-форма» при внедрении асимметричных элементов затруднения

$$M_{изг} = \frac{E_{отл}^2 A_{отл} \Delta T \kappa \alpha \ell'''}{2(1 - \Delta T \alpha)} \left( \frac{1}{E_{отл} \kappa \ell'''} + 2 \ell' \delta_x \sum_{i=1}^n E_i(t)} - \frac{1}{E_{отл} \kappa \ell'''} + 2 \ell' \delta_x \sum_{i=1}^{\psi} E_i(t)} \right) \times$$

$$\times \left( n \delta_x + \frac{\delta_x^2 \sum_{i=n+1}^{\psi} E_i(t) [2(i-n)-1]}{2 \delta_x \sum_{i=n+1}^{\psi} E_i(t)} \right), \tag{1}$$

где  $\alpha$  – коэффициент температурного расширения,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $\Delta T$  – градиент по времени средней по толщине температуры стенки отливки,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $E_i(t)$  – температурные зависимости модулей продольной упругости слоев формовочной смеси;  $\delta_x$  – шаг (величина) слоя  $x$ , м;  $\kappa$  – половина толщины стенки отливки, м;  $l'$  – длина сжимаемого слоя после свободной деформации, м;  $l''$  – длина сжимаемого слоя до деформации, м;  $E_{отл}$  – модуль продольной упругости отливки, МПа;  $A_{отл}$  – площадь поперечного сечения отливки,  $\text{м}^2$ ;  $\Psi, n$  – области формовочной смеси, вызывающие изгибающую и растягивающую деформации соответственно.

Напряжения в упругой зоне деформирования могут быть определены по уравнению Навье, которое для рассматриваемых условий расчета при прямоугольном сечении примет вид

$$\sigma_{упр} = \frac{M_u \kappa}{2I_x} = \frac{12M_u \kappa}{2b\kappa^3} = \frac{6M_u \kappa}{A_{отл} \kappa^2}, \quad (2)$$

где  $M_u$  – момент от изгибающего усилия  $P_w$ ,  $\text{кН}\cdot\text{м}$ ;  $A_{отл}$  – площадь поперечного сечения отливки,  $\text{м}^2$ ;  $I_x$  – момент инерции сечения,  $\text{м}^4$ ;  $b$  – длина зоны деформирования, м.

Подставив правую часть выражения (2) в выражение (1), получим формулу напряжений при упругом деформировании материала:

$$\sigma_{упр} = \frac{3E_{отл}^2 \Delta T \alpha l''}{1 - \Delta T \alpha} \left( \frac{1}{E_{отл} \kappa l'' + 2l' \delta_x \sum_{i=1}^n E_i} - \frac{1}{E_{отл} \kappa l'' + 2l' \delta_x \sum_{i=1}^{\Psi} E_i} \right) \times \left( n \delta_x + \frac{\delta_x^2 \sum_{i=n+1}^{\Psi} E_i [2(i-n)-1]}{2 \delta_x \sum_{i=n+1}^{\Psi} E_i} \right). \quad (3)$$

Для расчета напряжений, полученных в условиях упругопластической деформации, воспользуемся условием равенства удельных работ при пластической и упругой деформации.

Пусть при упругом деформировании график нарастания напряжений выглядит, как представлено на рис. 3, тогда удельная работа внутренних сил  $A_{уд}^{упр}$ , совершенная изгибающим моментом, будет равна

$$A_{уд}^{упр} = \int_0^{\varepsilon_{упр}} \sigma d\varepsilon. \quad (4)$$

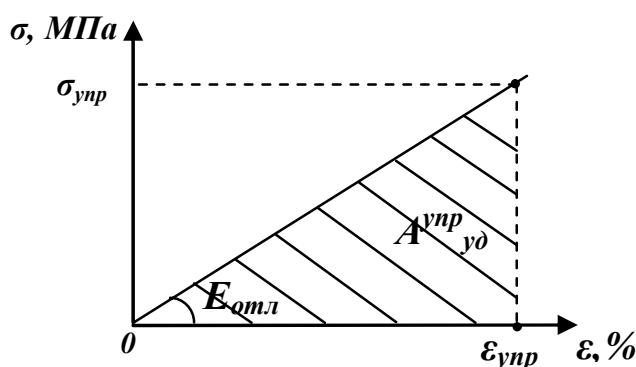


Рис. 3. Схема к расчету работы упругой деформации

Для расчета напряжений при упругопластическом деформировании воспользуемся математической моделью, получение и анализ возможности применения которой детально описано в источниках [2, 3].

$$\sigma = \frac{\left( 1 - \frac{e^{-\frac{25}{\varepsilon_{0,2}}[\varepsilon - \varepsilon_{0,2}]} - e^{-\frac{25}{\varepsilon_T}[\varepsilon - \varepsilon_{0,2}]}}{e^{\frac{25}{\varepsilon_{0,2}}[\varepsilon - \varepsilon_{0,2}]} + e^{\frac{25}{\varepsilon_T}[\varepsilon - \varepsilon_{0,2}]}} \right) \varepsilon E_{отл}}{2} + \frac{\left( 1 + \frac{e^{\frac{25}{\varepsilon_{0,2}}[\varepsilon - \varepsilon_{0,2}]} - e^{\frac{25}{\varepsilon_{0,2}}[\varepsilon - \varepsilon_{0,2}]}}{e^{\frac{25}{\varepsilon_{0,2}}[\varepsilon - \varepsilon_{0,2}]} + e^{\frac{25}{\varepsilon_{0,2}}[\varepsilon - \varepsilon_{0,2}]}} \right) \left[ \frac{(\sigma_{\varepsilon} - \sigma_{0,2})(\varepsilon - \varepsilon_{0,2})}{\delta_{пласт}} + \varepsilon_{0,2} E_{отл} \right]}{2}, \quad 0 < \varepsilon < \varepsilon_{\varepsilon}, \tag{5}$$

при  $\varepsilon_{\varepsilon} = \varepsilon_{0,2} + \delta_{пласт}$ ,

где  $\sigma_{\varepsilon}$ ,  $\sigma_{0,2}$  – предел прочности, условный предел текучести соответственно;  $\varepsilon$  – величина деформации, МПа;  $\delta_{пласт}$  – величина зоны пластической деформации, %.

Выражение описывает величину напряжений, возникающих при упругопластической деформации (рис. 4).

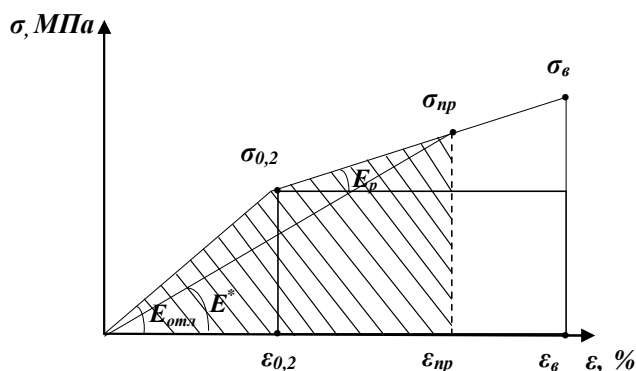


Рис. 4. Схема упругопластического деформирования материала (по выражению (5))

А выражение удельной работы упругопластической деформации будет выглядеть как

$$A_{уд}^{нл} = \int_0^{\varepsilon_{0,2}} \sigma d\varepsilon + \int_{\varepsilon_{0,2}}^{\varepsilon_{\varepsilon}} \sigma d\varepsilon. \tag{6}$$

Откуда на основании выражения (4) получим

$$A_{уд}^{унр} = \frac{\sigma_{унр} \varepsilon_{унр}}{2}. \tag{7}$$

При  $\varepsilon_{унр} = \frac{\sigma_{унр}}{E_{отл}}$  (закон Гука) [4] выражение (7) примет вид

$$A_{уд}^{унр} = \frac{\sigma_{унр}^2}{2 E_{отл}}. \tag{8}$$

Удельная работа упругопластической деформации будет равна

$$A_{уд}^{нл} = \frac{\sigma_{0,2} \varepsilon_{0,2}}{2} + \sigma_{0,2} (\varepsilon_{нл} - \varepsilon_{0,2}) + \frac{(\sigma_{нл} - \sigma_{0,2})(\varepsilon_{нл} - \varepsilon_{0,2})}{2}. \tag{9}$$

Расчитаем модуль  $E_p$  (см. рис. 4) как

$$E_p = \frac{(\sigma_{nl} - \sigma_{0,2})}{(\varepsilon_{nl} - \varepsilon_{0,2})} = \frac{(\sigma_{\varepsilon} - \sigma_{0,2})}{(\varepsilon_{\varepsilon} - \varepsilon_{0,2})}. \quad (10)$$

Выразив разность деформаций

$$(\varepsilon_{nl} - \varepsilon_{0,2}) = \frac{(\sigma_{nl} - \sigma_{0,2})}{E_p}, \quad (11)$$

подставим выражение (11) в выражение (9), получим

$$A_{yo}^{nl} = \frac{\sigma_{0,2}\varepsilon_{0,2}}{2} + \frac{\sigma_{0,2}(\sigma_{nl} - \sigma_{0,2})}{E_p} + \frac{(\sigma_{nl} - \sigma_{0,2})(\sigma_{nl} - \sigma_{0,2})}{2E_p}. \quad (12)$$

Упростим выражение (12)

$$A_{yo}^{nl} = \frac{\sigma_{0,2}\varepsilon_{0,2}}{2} + \frac{\sigma_{nl}^2 - \sigma_{0,2}^2}{2E_p}. \quad (13)$$

Рассмотрев равенство работ по выражениям (8) и (13)

$$\frac{\sigma_{ynp}^2}{2E_{омл}} = \frac{\sigma_{0,2}\varepsilon_{0,2}}{2} + \frac{\sigma_{nl}^2 - \sigma_{0,2}^2}{2E_p}, \quad (14)$$

выразим  $\sigma_{nl}$  как

$$\sigma_{nl} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{ynp}^2}{E_{омл}} - \sigma_{0,2}\varepsilon_{0,2}\right)E_p + \sigma_{0,2}^2}. \quad (15)$$

Выражение (15) позволяет определить напряжение на участке пластического деформирования ( $\varepsilon_{0,2} - \varepsilon_{\varepsilon}$ ). Используя решение, полученное в источнике [5], запишем промежуточное уравнение напряжений на всем протяжении упругопластической деформации.

$$\sigma_{np} = \frac{1}{2} \left[ \sigma_{ynp} \left( 1 - th \left( \frac{25}{\varepsilon_{0,2}} (\sigma_{ynp} - \sigma_{0,2}) \right) \right) + \left( 1 + th \left( \frac{25}{\varepsilon_{0,2}} (\sigma_{ynp} - \sigma_{0,2}) \right) \right) \sqrt{\left(\frac{\sigma_{ynp}^2}{E_{омл}} - \sigma_{0,2}\varepsilon_{0,2}\right)E_p + \sigma_{0,2}^2} \right]. \quad (16)$$

Величину  $\varepsilon_{np}$  найдем, используя правое слагаемое выражения (5). Учитывая, что в зоне пластического деформирования множитель

$$\frac{\left( \frac{e^{\frac{25}{\varepsilon_{0,2}}[\varepsilon - \varepsilon_{0,2}]} - e^{-\frac{25}{\varepsilon_T}[\varepsilon - \varepsilon_{0,2}]}}{e^{\frac{25}{\varepsilon_{0,2}}[\varepsilon - \varepsilon_{0,2}]} + e^{\frac{25}{\varepsilon_{0,2}}[\varepsilon - \varepsilon_{0,2}]}} \right)}{2} = 1 \quad (17)$$

равен единице, то  $\varepsilon_{np}$  определим как

$$\sigma_{np} = \frac{(\sigma_{\varepsilon} - \sigma_{0,2})(\varepsilon_{np} - \varepsilon_{0,2})}{\delta_{пласт}} + \varepsilon_{0,2}E_{омл}. \quad (18)$$



Откуда величина пластической деформации будет определяться как

$$\varepsilon_{np} = \frac{(\sigma_{np} - \varepsilon_{0,2} E_{омл}) \delta_{пласт}}{(\sigma_{\sigma} - \sigma_{0,2})} + \varepsilon_{0,2}. \quad (19)$$

А деформация на всем протяжении упругопластической деформации

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sigma_{np}}{E_{омл}} \left( 1 - th \left( \frac{25}{\varepsilon_{0,2}} (\sigma_{ynp} - \sigma_{0,2}) \right) \right) + \left( 1 + th \left( \frac{25}{\varepsilon_{0,2}} (\sigma_{ynp} - \sigma_{0,2}) \right) \right) \left( \frac{(\sigma_{np} - \varepsilon_{0,2} E_{омл}) \delta_{пласт}}{(\sigma_{\sigma} - \sigma_{0,2})} + \varepsilon_{0,2} \right) \right]. \quad (20)$$

Используя значение  $\varepsilon_{np}$ , определим мгновенный модуль  $E^*$  как

$$E^* = \frac{\sigma_{np}}{\varepsilon_{np}}, \quad (21)$$

тогда конечное уравнение напряжений на всем протяжении упругопластической деформации будет выглядеть как

$$\sigma_{изг} = \frac{3E^{*2} \Delta T \alpha \ell''}{1 - \Delta T \alpha} \left( \frac{1}{E^* \kappa \ell'' + 2 \ell' \delta_x \sum_{i=1}^n E_i} - \frac{1}{E^* \kappa \ell'' + 2 \ell' \delta_x \sum_{i=1}^{\psi} E_i} \right) \times \left( n \delta_x + \frac{\delta_x^2 \sum_{i=n+1}^{\psi} E_i [2(i-n)-1]}{2 \delta_x \sum_{i=n+1}^{\psi} E_i} \right). \quad (22)$$

Таким образом, используя выражения (3), (22), возможно определение напряжений от изгибного момента при упругопластичном деформировании.

Применив выражения (1), (3), (22), определим напряжение от изгибного момента при упругопластическом деформировании в момент образования горячей трещины в отливке «Шлаковая чаша». Полученное значение сравним с составляющими полного напряженного состояния (рис. 5), взятого относительно предела прочности материала отливки Ст.25Л при средней температуре по толщине стенки  $T=1443 \text{ }^\circ\text{C}$ .

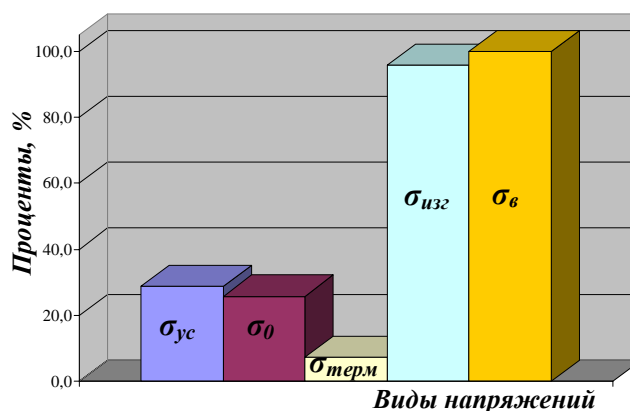


Рис. 5. Напряженное состояние в месте образования горячей трещины отливки «Шлаковая чаша»:  $\sigma_{ус}$  – усадочные напряжения;  $\sigma_{\theta}$  – окружные;  $\sigma_{терм}$  – термические;  $\sigma_{изг}$  – изгибные;  $\sigma_{\sigma}$  – предел прочности

### Заключение

Как видно из рис. 5, из составляющих полного напряженного состояния в месте образования горячей трещины наибольшим является изгибное напряжение от действия асимметричных элементов внедрения. Уменьшение размеров элемента внедрения, применение локального увеличения податливости слоя формовочной смеси, взаимодействующего с ним, – все эти действия могут значительно уменьшить значение изгибных напряжений, а следовательно, снизить вероятность образования брака по горячим трещинам в отливке «Шлаковая чаша».

### Список литературы

1. Determination of internal forces in the cooled walls of the casting in the implementation of asymmetric elements difficulties/ Savinov A.S. Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Feoktistov N.A. // European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International scientific conference. «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. Vienna, 2014. P. 106–112.
2. Kolokoltsev V.M., Savinov A.S. The simulation of the carbon steel deformation resistance in the brittleness temperature range / Zajemska, Monika. Czestochowa: Czestochowa university of technology, Faculty of production engineering and materials technology, 2014.
3. Сравнительный анализ удельных работ внутренних сил при расчете различными методами / Савинов А.С., Селезнёв О.Е., Поляруш И.В. и др. // Механическое оборудование металлургических заводов: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. С. 154–157.
4. Степин П.А. Сопротивление материалов. М.: Интеграл-Пресс, 1997. 320 с.
5. Савинов А.С., Тубольцева А.С., Назаренко Д.И. Моделирование сопротивления деформации материала на примере диаграммы растяжения сплава ХН70ВМТЮ // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2011. С. 272–276.

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

## STRESS STATE CALCULATION WHEN INTRODUCING ASYMMETRIC HINDRANCE ELEMENTS OF CAST DETAILS INTO SAND LAYER OF VARIABLE RIGIDITY

**Savinov Alexander Sergeevich** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-18. E-mail: Savinov\_nis@mail.ru.

**Abstract.** The article considers initiation of cooling stresses of elastic-plastic deformation of “slag pot” castings, a factor which leads to casting-wall discontinuity and pull-crack defects. A mathematical model has been built and the casting-mould force interaction has been calculated basing on algorithms proposed by the author.

Quantities of total stress state in the casting wall during crack formation have been determined. It has been found out that bending stress making up 96% of the casting tensile strength value has a greater impact on defect formation. Process techniques to reduce pull-crack formation in castings have been proposed on the basis of the work results.

**Keywords:** Casting, pull crack, «slag pot», elastic plastic deformation, bending stress.

### References

1. Determination of internal forces in the cooled walls of the casting in the implementation of asymmetric hindrance elements / Savinov A.S., Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Feoktistov N.A./ «European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences» Proceedings of the 5<sup>th</sup> International scientific conference. «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. Vienna. 2014, pp. 106-112.
2. Kolokoltsev V.M., Savinov A.S. Simulation of the carbon steel deformation resistance in the brittleness temperature range / Zajemska, Monika. Czestochowa : Czestochowa university of technology, Faculty of production engineering and materials technology , 2014.
3. Savinov A.S., Selezniy O.E., Poliarush I.V., and colleagues. Comparative analysis of the specific work of internal forces at different calculation methods. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov* [Mechanical equipment of metallurgical plants: International collection of scientific papers]. Magnitogorsk: Publishing house of the Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, pp. 154-157.
4. Stepin P.A. Materials resistance. M.: Integral-Press, 1997, 320 p.
5. Savinov A.S., Tuboltseva A.S., Nazarenko D.I. Simulation of the material strain resistance: a study of the tensile stress-strain diagram of KHN70VMTYU alloy. Modern tool systems, information technologies, and innovations: the VIII International scientific conference proceedings - Kursk: South-Western State University, 2011, pp. 272-276.

Савинов А.С. Расчет напряженного состояния при внедрении ассиметричных элементов затруднения литой детали в слой формовочной смеси переменной жесткости // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 64–70.

Savinov A.S. Stress state calculation when introducing asymmetric hindrance elements of cast details into sand layer of variable rigidity. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 64–70.

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.778.01

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ВОЛОЧЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОЙ АРМАТУРНОЙ ПРОВОЛОКИ

Головизнин С.М.<sup>1</sup>, Покачалов В.В.<sup>1</sup>, Пыхов Л.Э.<sup>2</sup><sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия<sup>2</sup> Белорецкий металлургический комбинат, Белорецк, Россия

**Аннотация.** Проведено исследование зависимости механических свойств высокопрочной арматурной проволоки от скорости волочения. Исследование проводилось для двух сталей с различным химическим составом. Были выполнены эксперименты для скоростей волочения 4,0 и 6,3 м/с. На готовой проволоке измерены предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и распределение микротвердости по сечению проволоки. Показано, что механические свойства проволоки зависят от скорости волочения. Полученные зависимости существенно отличаются для сталей с различным химическим составом.

**Ключевые слова:** волочение стальной проволоки, высокопрочная арматурная проволока, скорость волочения, механические свойства.

### Введение

Изготовление высокопрочной арматурной проволоки – достаточно сложная задача. Арматурная проволока должна быть прочной, чтобы выдерживать нагрузки при эксплуатации и при этом не должна быть хрупкой, чтобы предотвратить разрывы при эксплуатации и натяжении [1, 13, 14]. Мировой тенденцией в области технологий производства высокопрочной арматуры является переход от технологий горячей прокатки и термического упрочнения к технологиям деформационного упрочнения в сочетании с последующей механо-термической обработкой [2]. Прочностные характеристики проволоки растут с увеличением содержания углерода, но при этом проволока становится более хрупкой. На практике это противоречие пытаются разрешить применением легированных сталей, например сталей с повышенным содержанием ванадия и хрома. Условия волочения с применением высокопрочных сталей, в частности зависимость механических свойств от скорости волочения, имеют свои особенности [3–5]. Влияние скорости протяжки на механические свойства и условия высокоскоростного волочения высокопрочной проволоки в настоящее время изучено недостаточно [6–9, 12].

Цель работы – исследование влияния скорости на механические свойства высокопрочной арматурной проволоки.

### Методика и результаты эксперимента

В работе проводилось волочение проволоки из стали 80 по маршруту 10,0-8,95-8,05-7,23-6,55-5,95-5,45-5,03 мм со скоростями волочения 6,3 и 4,0 м/с, волочение проволоки из стали марки 80Ф-1 по маршруту 9,0-8,05-7,23-6,55-5,95-5,45-5,03 мм со скоростями волочения 6,3 и 4,0 м/с. На готовой проволоке измерили механические свойства, такие как предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и распределение микротвердости по сечению проволоки.

Химический состав рассмотренных марок стали (%)

Марка стали	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	V	Ti
80	0,82	0,68	0,28	0,007	0,012	0,04	0,04	0,05	0,04	0,02	0,007	0,004
80Ф-1	0,81	0,68	0,21	0,004	0,015	0,09	0,004	0,05	0,03	0,02	0,07	0,004

На рис. 1 представлена зависимость, отражающая влияние скорости волочения на прочностные свойства арматурной проволоки из стали 80Ф-1, легированной хромом и ванадием. Согласно представленным данным прочностные свойства готовой проволоки (временное сопротивление и предел текучести) растут с увеличением скорости волочения.

На рис. 2 представлена зависимость проч-

ностных свойств готовой арматурной проволоки из стали 80 от скорости волочения. В отличие от аналогичной зависимости для стали 80Ф-1, прочностные свойства проволоки уменьшаются, что можно объяснить более сильной зависимостью механических свойств проволоки от температуры, чем в предыдущем случае.

На рис. 3 представлена зависимость пластических свойств от скорости волочения арматурной проволоки из стали марки 80Ф-1.

Согласно представленным данным пластические свойства проволоки уменьшаются с увеличением скорости волочения.

На рис. 4 представлена зависимость пластических свойств от скорости волочения для стали марки 80. Из представленных зависимостей можно сделать вывод, что в отличие от стали, легированной хромом и ванадием, пластические свойства проволоки из стали 80 имеют тенденцию к увеличению с ростом скорости волочения.

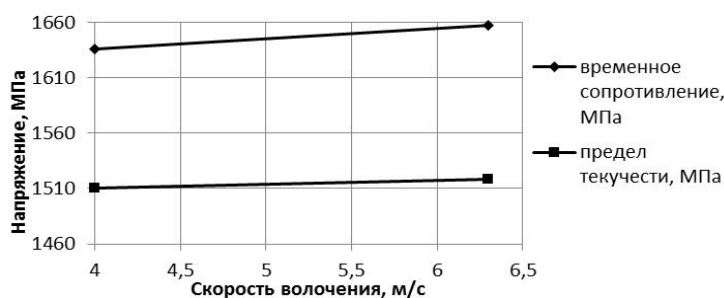


Рис. 1. Зависимость предела текучести и временного сопротивления от скорости волочения для стали 80Ф-1

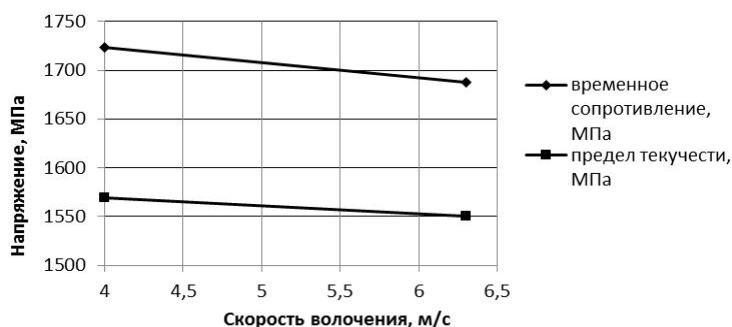


Рис. 2. Зависимость предела текучести и временного сопротивления от скорости волочения для стали 80

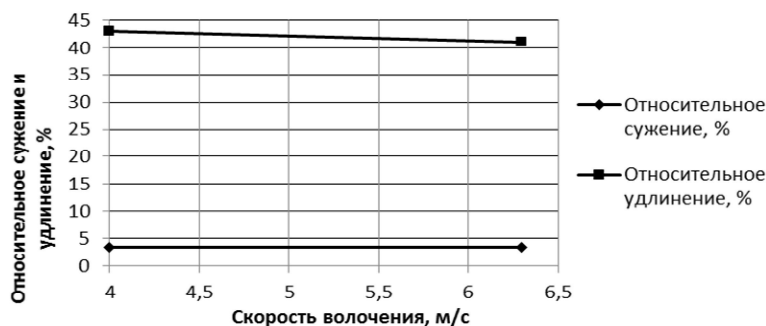


Рис. 3. Зависимость относительного сужения и удлинения от скорости волочения для стали 80Ф-1

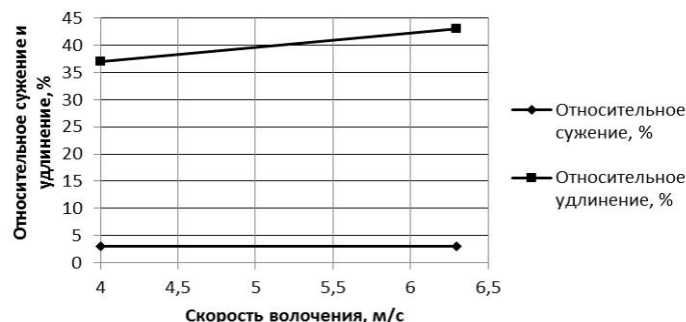


Рис. 4. Зависимость относительного сужения и удлинения от скорости волочения для стали 80



Пластические свойства проволоки из стали 80, как и 80Ф-1, меняются противоположно прочностным свойствам, то есть рост прочностных свойств сопровождается снижением пластических свойств проволоки. Анализ представленных зависимостей показывает, что скорость волочения по-разному влияет на механические свойства готовой арматурной проволоки. Прочностные свойства проволоки из легированной стали с ростом скорости волочения растут, а пластические свойства уменьшаются. У стали 80, наоборот, прочностные свойства уменьшаются, а пластические имеют тенденцию к росту. Температура высокопрочных сталей может значительно возрастать при увеличении скорости волочения [5, 8, 11]. Температурные зависимости механических свойств исследуемых сталей отличаются [10], и в случае применения стали 80 это может привести к тому, что с ростом температуры может наблюдаться снижение прочностных и повышение пластических свойств проволоки.

На рис. 5, 6 представлено распределение микротвердости по сечению готовой арматурной проволоки диаметром 5 мм из стали 80 и 80Ф-1 для двух различных скоростей.

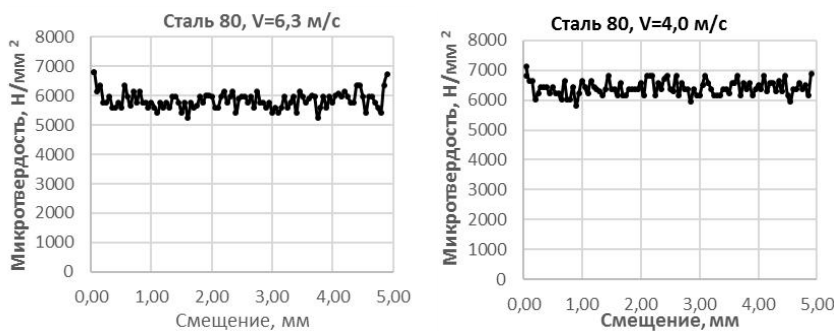


Рис. 5. Распределение микротвердости по сечению проволоки для стали 80

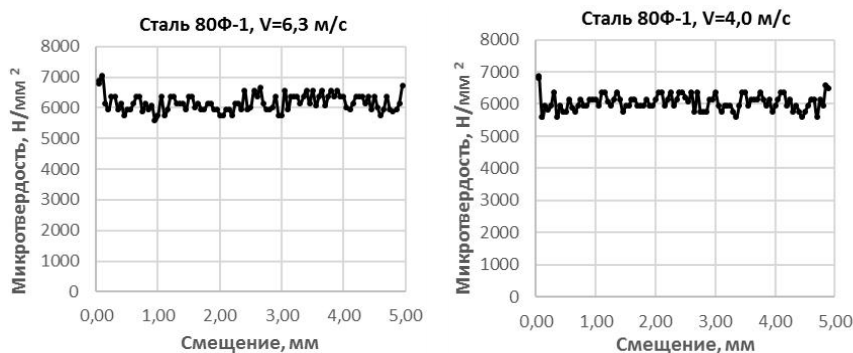


Рис. 6. Распределение микротвердости по сечению проволоки для стали 80Ф-1

Зависимости средних значений микротвердости по сечению проволоки от скорости волочения для стали 80 и 80Ф-1 представлены на рис. 7.

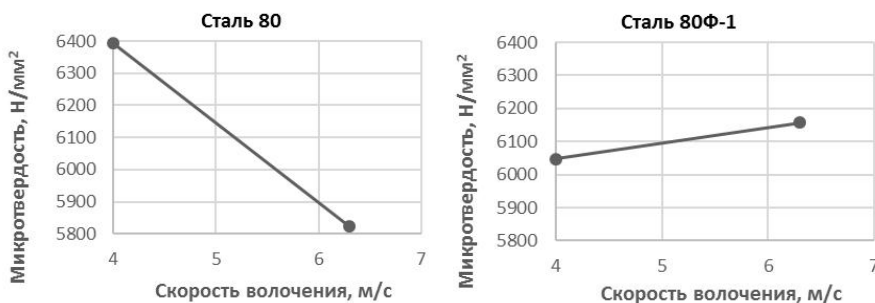


Рис. 7. Зависимость средней по сечению микротвердости от скорости волочения

Можно отметить, что на представленных зависимостях характер распределения микротвердости по сечению проволоки имеет одинаковый характер. Это повышенная микротвердость в приповерхностном слое проволоки и относительно равномерное распределение по объёму проволоки. Как правило, повышенная твёрдость в приповерхностном слое появляется уже на стадии изготовления катанки. Это связано с условиями охлаждения катанки, так как приповерхностный слой охлаждается более интенсивно, чем сердцевина катанки, а также с условиями деформации, так как при прокатке и при волочении скорость деформации на поверхности, как правило, выше, чем в объёме изделия. При волочении арматурной проволоки эта тенденция сохраняется, так как температурные и деформационные условия на поверхности и в центральных областях проволоки значительно отличаются. В работе [2] также отмечено увеличение микротвердости арматурной проволоки в направлении от центра к поверхности.

### Выводы

Показано, что механические свойства готовой арматурной проволоки существенно зависят от скорости волочения. Характер зависимостей механических свойств от скорости волочения меняется при использовании заготовки из различных марок стали. Изменение микротвердости коррелирует с изменениями механических свойств готовой проволоки. Распределение микро-

твердости по сечению проволоки имеет одинаковый вид для всех исследованных режимов волочения и марок стали. Характерной особенностью распределения является повышенная микротвердость в приповерхностном слое проволоки. Поверхностный слой формируется на этапе изготовления катанки и при волочении проволоки. Механические свойства внешних слоёв проволоки определяются повышенной температурой, ускоренным охлаждением и более высокой скоростью деформации на поверхности заготовки при прокатке катанки и волочении проволоки. Основными конкурирующими факторами, влияющими на механические свойства проволоки при волочении, являются увеличение сопротивления деформации и температуры с ростом скорости деформации. Оба фактора влияют на условия деформации в противоположных направлениях и результат их действия зависит от степени преобладания того или другого фактора. Наблюдаемый эффект понижения прочностных свойств при увеличении скорости волочения связан с тем, что температурный эффект в данном случае является преобладающим.

#### Список литературы

1. Юхвец И.А. Производство высокопрочной проволочной арматуры. М.: Metallurgizdat, 1973. 264 с.
2. Особенности деформационной обработки высокопрочной арматуры для железобетонных шпал нового поколения / А.Г. Корчунов, М.В. Чукин, Г.С. Гун и др. // Вестник ЮУрГУ. 2011. № 36. С. 76–80.
3. Харитонов В.А., Головизнин С.М. Проектирование режимов высокоскоростного волочения проволоки на основе моделирования: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 117 с.
4. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. М.: Metallurgiya, 1971. 448 с.
5. Мейерс М.А. и Мур Л.Е. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов: пер. с англ. М.: Metallurgiya, 1984. 512 с.
6. Enghag, Per. Steel wire technology. Sweden. Örebro University, 2009. 351 p.
7. Wright, Roger N. Wire technology: process engineering and metallurgy. Elsevier, 2011. 320 p.
8. B. Golis, J.W. Pilarczyk, Z. Muskalski et al. Strain rate in wire drawing process // Wire Industry. 2004. № 840. P. 200, 202–206.
9. George E. Dieter, Howard A. Kuhn, S. Lee Semiatin. Handbook of workability and process design. Materials Park, OH: ASM International, 2003. 414 p.
10. Sang-Kon Lee, Seon-Bong Lee, Byung-Min Kim. Process design of multi-stage wet wire drawing for improving the drawing speed for 0.72 wt% C steel wire // Journal of Materials Processing Technology. 210 (2010), 776–783.
11. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: Metallurgiya, 1973. 224 с.
12. Харитонов В.А., Головизнин С.М. Расчёт скоростных напряжений при протяжке проволоки в клиновидном очаге деформации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2005. №3(11). С. 48–50.
13. Покачалов В.В., Терских С.А., Терских Д.С. Особенности изготовления арматурной проволоки из сорбитизированной катанки с учетом проявления масштабного эффекта // Обработка сплошных и слоистых материалов.: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 35. Магнитогорск: МГТУ, 2008. С. 68–73.
14. Сравнительный анализ современных требований к арматурному прокату для ненапряженного железобетона / Снимщиков С.В., Суриков И.Н., Харитонов В.А., Харитонов В.А. // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2014. № 2. С. 56–59.

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

### EFFECTS OF WIRE DRAWING SPEED ON MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH REINFORCING WIRE

**Goloviznin Sergey Mikhailovich** – Ph.D. (Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: golovz@mail.ru.

**Pokachalov Victor Vladimirovich** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Pykhov Leonid Ernstovich** – Head of the central laboratory, OJSC Beloretsk Metallurgical Plant, Beloretsk, Russia.

**Abstract.** The article deals with effects of wire drawing speed on mechanical properties of high-strength reinforcing wire. Two steels of different chemical composition were studied. Experiments were carried out for wire drawing at 4,0 m/s and 6,3 m/s. Tensile strength, yield strength, tensile elongation, and cross-sectional micro-hardness distribution were measured. The experiments demonstrated that mechanical properties depended on the drawing rate. There is a dramatic difference in dependencies obtained for steels of different chemical composition.

**Keywords:** Steel wire drawing, high-strength reinforcing wire, wire drawing speed, mechanical properties.

#### References

1. Yuhvets I.A. *Proizvodstvo vyisokoprochnoy provolochnoy armaturyi* [High-strength reinforcing wire production]. Moscow: Metallurgizdat, 1973. 264 p.
2. Korchunov A.G., Chukin M.V., Gun G.S. i dr. *Vestnik YuUrGU* [Bulletin SUSU]. 2011, no. 36, pp. 76–80.
3. Kharitonov V.A., Goloviznin S.M. *Proektirovanie rezhimov vyisokoskorostnogo volocheniya provoloki na osnove modelirovaniya: monografiya* [Simulation-based design of high-speed wire-drawing schedules: monography]. Magnitogorsk, 2011, 117 p.
4. Perlin I.L., Ermanok M.Z. *Teoriya volocheniya* [Theory of wire drawing]. Moscow: Metallurgiya, 1971. 448 p.
5. Meyers M.A., Murr L.E. *Shock waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals*: Translated from English. Moscow: Metallurgiya, 1984. 512 p.
6. Enghag, Per. *Steel wire technology*. Sweden. Örebro University. 2009. 351 p.
7. Wright, Roger N. *Wire technology: process engineering and metallurgy*. Elsevier. 2011. 320 p.
8. Golis B., Pilarczyk J.W., Muskalski Z. et al. Strain rate in wire drawing process. *Wire Industry*. 2004, no. 840, pp. 200, 202–206.
9. George E. Dieter, Howard A. Kuhn, S. Lee Semiatin. *Handbook of workability and process design*. Materials Park, OH: ASM International. 2003, 414 p.

10. Sang-Kon Lee, Seon-Bong Lee, Byung-Min Kim. Process design of multi-stage wet wire drawing for improving the drawing speed for 0.72 wt% C steel wire. *Journal of Materials Processing Technology*. 210 (2010), pp. 776–783.
11. Tretyakov A.V., Zyuzin V.I. *Mekhanicheskie svoystva metallov i splavov pri obrabotke davleniem* [Metal and alloy mechanics under metal forming conditions]. Moscow: Metallurgiya, 1973. 224 p.
12. Kharitonov V.A., Goloviznin S.M. Calculation of velocity stresses in a wedge-like deformation zone at wire-drawing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2005, no. 3 (11), pp. 48–50.
13. Pokachalov V.V., Terskikh S.A., Terskikh D.S. Reinforcing wire production from sorbitised rods considering the scale effect observed. *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov: mezhvuz. sb. nauch. tr., vyip. 35* [Solid and layered material processing: interinstitutional collection of scientific works, no. 35]. Magnitogorsk, 2008, pp. 68–73.
14. Snimshikov S.V., Surikov I.N., Kharitonov A.V., Kharitonov V.A. Comparative analysis of current requirements to reinforcing rolled products for non-tensioned reinforced concrete. *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov* [Solid and layered material processing]. 2014, no. 2, pp. 56–59.

Головизнин С.М., Покачалов В.В., Пыхов Л.Э. Влияние скорости волочения на механические свойства высокопрочной арматурной проволоки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 71–75.

Goloviznin S.M., Pokachalov V.V., Pykhov L.E. Effects of wire drawing speed on mechanical properties of high-strength reinforcing wire. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 71–75.

УДК 621.789

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ\*

Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Вафин Р.К.

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

**Аннотация.** В работе на основе математического моделирования методом конечных элементов выполнено численное исследование закономерностей деформационного разогрева металла и формирования температурного поля в очаге деформации при холодной асимметричной прокатке чистого алюминия Al 99,5% и высокопрочных сплавов Al 5083 и Al 7075 в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций. Установлены закономерности влияния коэффициента контактного трения, скорости прокатки, радиуса валков, степени деформации, а также прочностных свойств алюминиевых сплавов на температуру деформационного разогрева прокатываемых полос. Результаты исследования могут быть полезны при разработке оптимальных режимов асимметричной прокатки алюминиевых сплавов в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций для получения УМЗ структуры и повышенных прочностных свойств.

**Ключевые слова:** асимметричная прокатка, сдвиговая деформация, метод конечных элементов, интенсивная пластическая деформация, алюминиевый сплав, деформационный разогрев.

### Введение

Создание новых легких и сверхпрочных материалов для автомобильной, аэрокосмической и других отраслей промышленности рассматривается во всем мире как одно из ключевых направлений технологического прогресса [1–10]. Перспективным является создание ультрамелкозернистых (УМЗ) или наноструктурированных материалов на основе алюминия с использованием методов интенсивной пластической деформации (ИПД). Одним из наиболее прогрессивных промышленно-применимых методов ИПД для получения УМЗ структуры в тонких металлических листах является процесс асимметричной прокатки с большим (не менее 50%) рассогласованием скоростей валков [11–23].

Известно, что механизм ИПД при асимметрич-

ной тонколистовой прокатке состоит в создании в металле одновременно высоких деформаций сжатия и сдвига за счет противоположно направленных сил контактного трения, действующих на лист одновременно со стороны верхнего и нижнего валков, вращающихся с различными окружными скоростями. Сдвиговые деформации при этом характеризуются тангенсом макроскопического угла наклона слоев металла в вертикальной плоскости.

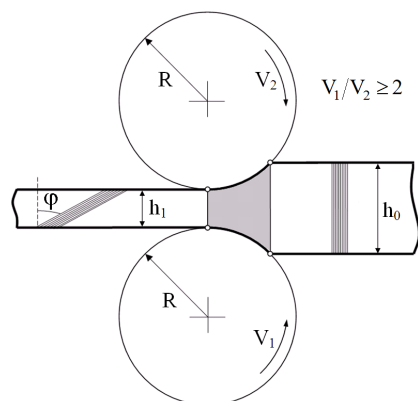
В работах [17–18] показано, что асимметричная прокатка металлических листов с высокой единичной степенью деформации ( $\epsilon \geq 50\%$ ), высоким коэффициентом контактного трения ( $\mu = 0,3–0,4$ ) и большим рассогласованием скоростей валков ( $V_1/V_2 \geq 2$ ) позволяет создавать в деформируемых металлах сверхвысокие сдвиговые деформации (угол сдвига  $\varphi = 45 \dots 85$  град) (рис. 1) и, соответственно, обеспечивать высокий уровень истинной накопленной деформации ( $e = 4 \dots 6$ ). Однако при таких параметрах реализации процесса

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта №15-19-10030.

© Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Вафин Р.К., 2015



происходит деформационный разогрев металла, который существенно влияет на термические и механические условия деформации металла. Такой разогрев для алюминиевых сплавов может достигать температуры начала рекристаллизации и даже температуры плавления.



**Рис. 1. Принципиальная схема процесса асимметричной прокатки с большим рассогласованием скоростей валков**

Целью данной работы является численное исследование и моделирование закономерностей деформационного разогрева металла и формирования температурного поля в очаге деформации при холодной асимметричной прокатке чистого алюминия Al 99,5% и его сплавов Al 5083 и Al 7075 в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций.

#### Материалы и метод исследования

Численное моделирование процесса асимметричной тонколистовой прокатки проводили методом конечных элементов с использованием программного комплекса DEFORM 2D. В качестве деформируемых материалов для моделирования были выбраны чистый алюминий Al 99,5% с начальным пределом текучести  $\sigma_{то} = 40$  МПа, а также высокопрочные алюминиевые сплавы Al 5083 ( $\sigma_{то} = 330$  МПа) и Al 7075 ( $\sigma_{то} = 496$  МПа). Высокопрочные алюминиевые сплавы интересны как реальные конструкционные материалы, широко используемые в различных отраслях промышленности. Материал валков – AISI-D2. Кривые текучести и теплофизические коэффициенты данных материалов были приняты из базы данных DEFORM 2D.

При моделировании процесса асимметричной прокатки в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций были приняты следующие допущения: 1) плоскодеформированное состояние металла; 2) деформируемая среда – упрочняющаяся жесткопластическая; 3) рабочие валки – абсолютно жесткие; 4) закон контактного трения – Кулона; 5) условия деформирования – неизотермические; 6) коэффициенты теплопередачи, теплоемкости, теплопроводности и черноты деформируе-

мых материалов являются константами; 7) на свободной поверхности имеет место теплопередача излучением и конвекцией в окружающую среду; 8) на контактной поверхности имеет место кондуктивный теплообмен между деформируемым металлом и поверхностью валков.

Исходные данные для моделирования: 1) начальная толщина полосы  $h_0=2,0$  мм; 2) начальная длина полосы 50 мм; 3) начальная температура деформируемого металла 20°C; 4) коэффициент теплопередачи на контакте полосы с валками при пластической деформации 11 Н/с/мм°C; 5) радиус валков  $R=100...200$  мм; 6) коэффициент контактного трения  $\mu=0,1...0,4$ ; 7) степень единичной высотной деформации  $\epsilon=50...60\%$ ; 8) коэффициент рассогласования скоростей валков  $k_v=1...2$  ( $V_1/V_2=k_v$ ); 9) скорость нижнего вала  $V_1=10...1000$  мм/с. Асимметричную прокатку проводили за один проход без натяжений. Во всех вариантах расчета для деформируемой полосы задавали сетку конечных элементов с 2000 четырехугольных элементов с коэффициентом сгущения 1; для валков задавали 10000 четырехугольных элементов с коэффициентом сгущения 5 у поверхности.

При численном моделировании процесса асимметричной прокатки оценивали влияние коэффициента контактного трения ( $\mu=0,1...0,4$ ), скорости прокатки ( $V_1=10...1000$  мм/с), радиуса валков ( $R=100...200$  мм), степени единичной деформации ( $\epsilon=50...70\%$ ), а также прочностных свойств алюминиевых сплавов ( $\sigma_{то} = 40...496$  МПа) на температуру деформационного разогрева прокатываемой полосы в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций (угол сдвига  $\phi=45...85$  град).

#### Результаты моделирования и их обсуждение

Асимметричная прокатка тонкой полосы из алюминиевого сплава Al 5083 характеризуется существенным деформационным разогревом металла в очаге деформации (рис. 2).

При прокатке полосы со скоростью  $V_1=1000$  мм/с температура металла резко (за 0,02 с.) возрастает с 20 до 325–379°C (рис. 3). Скорость разогрева при этом является экстремально высокой и достигает 17950°C/с. При этом разогрев металла по толщине (точки P1, P2, P3 на рис. 2) и длине очага деформации является неравномерным. В начале более интенсивно разогревается нижняя поверхность (точка P3), а на выходе из очага – верхняя поверхность (точка P1) полосы. Однако через 0,01 с (см. рис. 3) температура металла по толщине выравнивается и составляет 324°C. При дальнейшем охлаждении полосы на воздухе температура металла снижается с 324 до 24°C за 200 с. (рис. 4). Кратковременное повышение температуры металла в очаге деформации при ИПД может существенно влиять на миграцию границ и размер зерен [24].



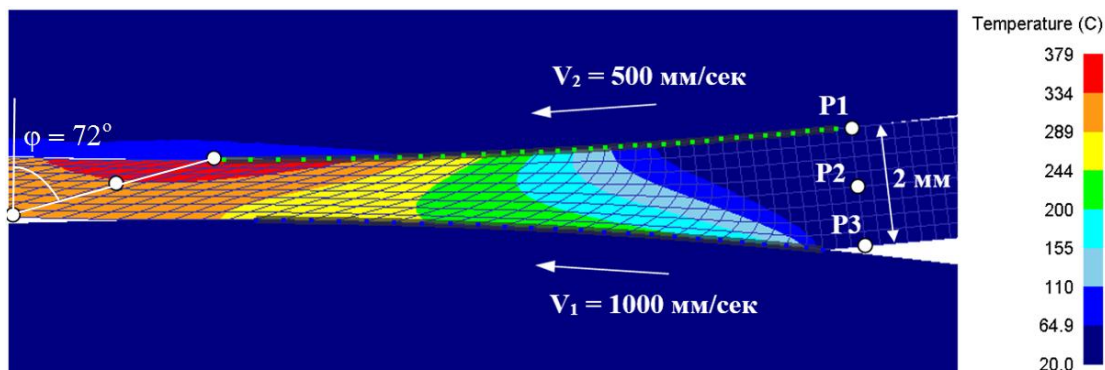


Рис. 2. Температурное поле в очаге деформации при асимметричной прокатке Al 5083 ( $h_0=2$  мм,  $\mu=0,4$ ,  $R=100$  мм,  $\epsilon=50\%$ ,  $k_v=2$ )

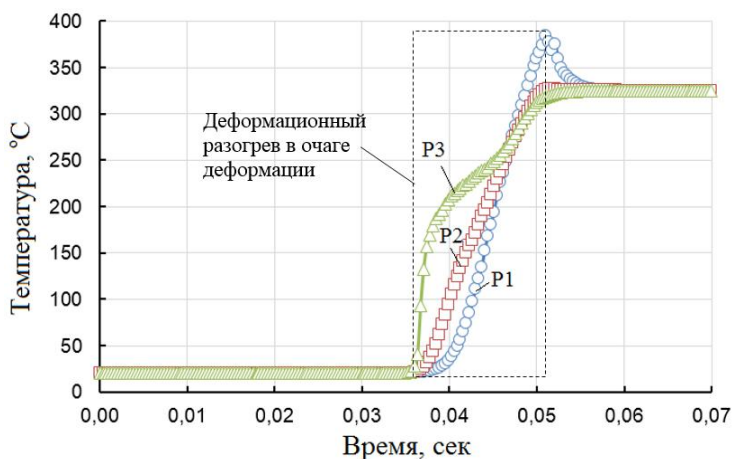


Рис. 3. Изменение температуры на верхней (P1), нижней (P3) поверхности, и в центре (P2) полосы при прокатке сплава Al 5083 ( $h_0=2$  мм,  $\mu=0,4$ ,  $R=100$  мм,  $\epsilon=50\%$ ,  $k_v=2$ ,  $V_1=1000$  мм/с)

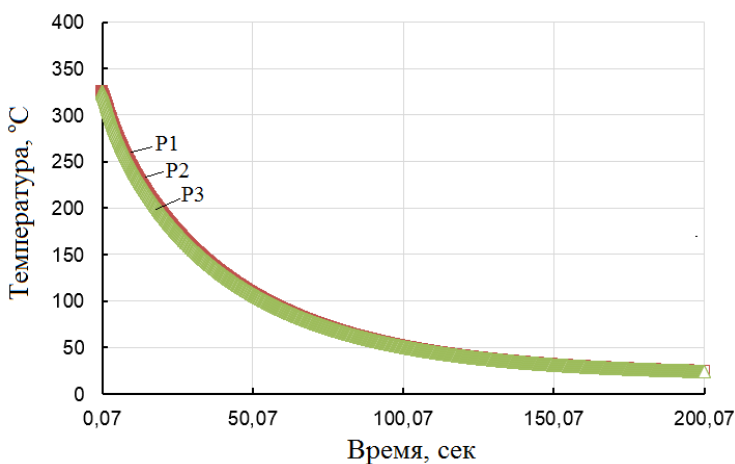


Рис. 4. Изменение температуры полосы при охлаждении алюминиевого сплава Al 5083 на воздухе

При асимметричной прокатке тонкой алюминиевой полосы с рассогласованием скоростей валков деформационный разогрев металла в очаге деформации при прочих равных условиях более интенсивный, на 20–27% выше, чем при обычной (симметричной) прокатке (рис. 5). Это связано с более высоким скольжением деформируемой полосы относительно контактной по-

верхности прокатных валков.

Известно, что повышение скорости деформации активизирует скольжение дислокаций и двойникование [24]. С повышением скорости деформации процесс измельчения структуры интенсифицируется, но увеличивается и деформационный разогрев. При асимметричной прокатке скорость деформации зависит, прежде всего, от скорости

прокатки, в частности от окружной скорости  $V_1$ . Снижение скорости  $V_1$  с 1000 до 10 мм/с позволяет существенно снизить деформационный разогрев металла в очаге деформации (рис. 6).

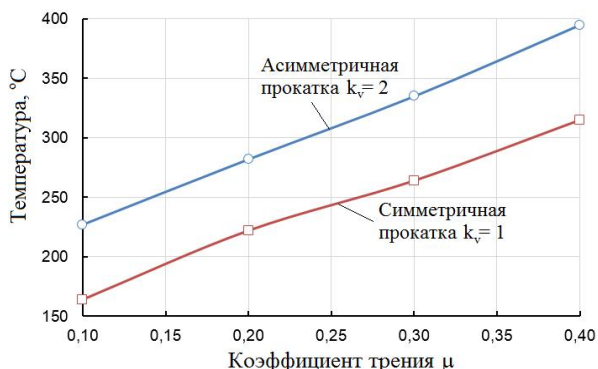


Рис. 5. Влияние способа прокатки на температуру деформационного разогрева сплава Al 5083 при  $h_0=2$  мм,  $R=100$  мм,  $\epsilon=50\%$ ,  $V_1=1000$  мм/с

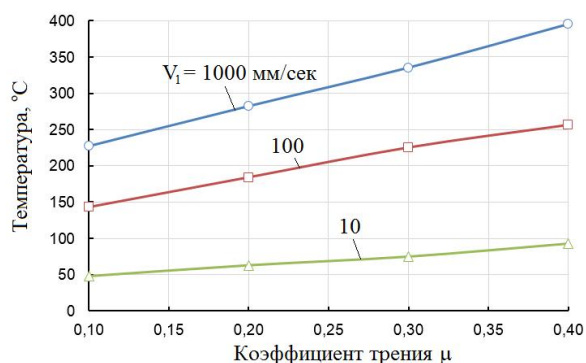


Рис. 6. Влияние окружной скорости валка  $V_1$  на температуру деформационного разогрева сплава Al 5083 при  $h_0=2$  мм,  $k_v=2$ ,  $R=100$  мм,  $\epsilon=50\%$

При асимметричной прокатке алюминия и его сплавов в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций допустимая скорость прокатки должна ограничиваться температурой деформационного разогрева металла, которая не должна превышать начальную температуру плавления сплава, поскольку в этом случае возможно образование трещин и горячее охрупчивание. А с точки зрения реализации процесса асимметричной прокатки в режиме ИПД для получения стабильных УМЗ температура деформационного разогрева металла не должна превышать температуру начала рекристаллизации данного алюминиевого сплава.

Следует отметить, что с увеличением прочности алюминиевого сплава (за счет легирования) снижается его температура начала плавления. Так, например, для чистого алюминия Al 99,5% температура солидус составляет 646°C, для сплава Al 5083 (Al-Mg-Mn) температура солидус равна 574°C, а для сплава Al 7075 (Al-Zn-Mg-Cu) температура солидус составляет уже

477°C, что связано с неполным растворением низкотемпературной эвтектической фазы AlMgCuZn. Результаты конечно-элементного моделирования процесса асимметричной прокатки высокопрочного алюминиевого сплава Al 7075 в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций ( $h_0=2$  мм,  $\mu=0,4$ ,  $R=100$  мм,  $\epsilon=50\%$ ,  $k_v=2$ ) показали, что при окружной скорости  $V_1=1000$  мм/с происходит разогрев металла в очаге деформации до температуры выше 477°C, что является недопустимым.

Рассмотрим, как влияют прочностные свойства алюминиевых сплавов на деформационный разогрев металла при асимметричной прокатке. При прочих равных условиях холодная прокатка более прочного сплава Al 7075 (начальный предел текучести  $\sigma_{T0} = 496$  МПа) сопровождается более интенсивным деформационным разогревом металла (рис. 7). Это связано с тем, что в очаге деформации возникают более высокие нормальные и касательные напряжения. Поэтому диссипация механической энергии пластического формоизменения таких материалов выше.

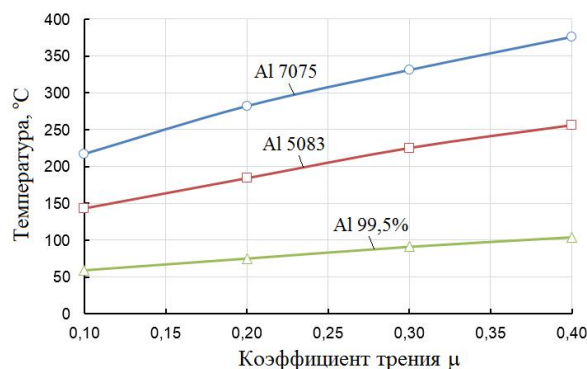
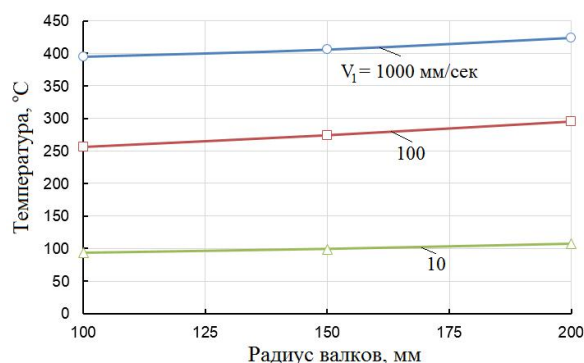


Рис. 7. Влияние прочности деформируемого металла на температуру деформационного разогрева при  $h_0=2$  мм,  $R=100$  мм,  $\epsilon=50\%$ ,  $k_v=2$ ,  $V_1=100$  мм/с

Увеличение радиуса валков со 100 до 200 мм при прочих равных условиях приводит к повышению на 7–13% температуры деформационного разогрева металла в очаге деформации при асимметричной прокатке (рис. 8). Это связано с увеличением механической энергии пластического формоизменения полосы при увеличении объема очага деформации.

Характер изменения температуры металла при асимметричной прокатке алюминиевого сплава Al 5083 существенно зависит от степени деформации. С увеличением степени деформации с 50 до 60% температура деформационного разогрева металла в очаге деформации (при  $h_0=2$  мм,  $\mu=0,4$ ,  $R=100$  мм,  $k_v=2$ ,  $V_1=1000$  мм/с) возрастает с 395°C до температуры начала плавления сплава (температура солидус 574°C).



**Рис. 8.** Влияние радиуса валков на температуру деформационного разогрева при асимметричной прокатке Al 5083 ( $h_0=2$  мм,  $\mu=0,4$ ,  $\epsilon=50\%$ ,  $k_v=2$ )

**Выводы**

1. Выполнено конечно-элементное моделирование процесса асимметричной холодной прокатки чистого алюминия Al 99,5% и его сплавов Al 5083 и Al 7075 в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций. Показано, что в очаге происходит существенный деформационный разогрев металла, который может достигать температур начала рекристаллизации и плавления.

2. На основе математического моделирования установлено, что при асимметричной прокатке полосы из сплава Al 5083 со скоростью  $V_1=1000$  мм/с температура металла резко (за 0,02 с.) возрастает с 20 до 325-379°C. Скорость разогрева при этом является экстремально высокой и достигает 17950°C/с, при этом разогрев металла по толщине и длине очага деформации является неравномерным. Кратковременное повышение температуры металла может существенно влиять на миграцию границ и размер зерен.

3. При асимметричной прокатке алюминия и его сплавов в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций допустимая скорость прокатки ограничивается температурой деформационного разогрева металла, которая не должна превышать температуру начала рекристаллизации и плавления. При снижении окружной скорости  $V_1$  с 1000 до 10 мм/с температура деформационного разогрева металла в очаге деформации снижается в 3-4 раза.

4. Асимметричная прокатка более прочных алюминиевых сплавов (например, Al 7075) сопровождается более интенсивным деформационным разогревом металла. Поэтому пластическое формоизменение таких материалов должно осуществляться при относительно низких скоростях деформирования.

5. Характер изменения температуры металла при асимметричной прокатке существенно зависит от радиуса валков R и степени деформации. С увеличением R от 100 до 200 мм температура металла в очаге деформации возрастает на 7-13%. При увеличении степени деформации с 50 до 60% тем-

пература деформационного разогрева металла возрастает более интенсивно (на 40-50%).

6. Результаты исследования могут быть полезны при разработке оптимальных режимов асимметричной прокатки алюминиевых сплавов в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций для получения УМЗ структуры и повышенных прочностных свойств.

**Список литературы**

1. Высокопрочные Al-Zn-Mg-Cu-сплавы и легкие Al-Li-сплавы / Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2011. №9. С. 27-33.
2. Елагин В.И. Пути развития высокопрочных и жаропрочных конструкционных алюминиевых сплавов в XXI столетии // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2007. №9. С. 3-11.
3. Разработка, моделирование и совершенствование процессов производства шаровых шарниров автомобилей / Гун И.Г., Михайловский И.А., Осипов Д.С., Куцпендик В.И., Сальников В.В., Гун Е.И., Смирнов А.В. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. №1 (45). С. 52-57.
4. Metallurgy qualimetry theory design and development / Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun I.G., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. №5. С. 67-69.
5. Применение логики антонимов для комплексного анализа качества автомобильного крепежа / Закиров Д.М., Осипов Д.С., Гун И.Г., Сабадаш А.В., Овчинников С.В., Майстренко В.В., Мезин И.Ю. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2010. №4. С. 57-62.
6. Комплексная оценка результативности сквозных технологий производства с использованием логики антонимов на примере шаровых пальцев / Гун И.Г., Михайловский И.А., Осипов Д.С., Сальников В.В. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2005. №1 (9). С. 67-71.
7. Исследование физико-механических свойств и структуры высокопрочных многофункциональных сплавов инварного класса нового поколения / Чукин М.В., Голубчик Э.М., Гун Г.С., Колцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Чукин Д.М., Матушкин А.Н. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. №1 (45). С. 43-47.
8. Генезис научных исследований в области качества металлопродукции / Гун Г.С., Мезин И.Ю., Рубин Г.Ш., Минаев А.А., Назайбеков А.Б., Дьяч Х. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. №1 (45). С. 92-96.
9. Nanodimensional structural part formation in high carbon steel by thermal and deformation processing / Chukin M.V., Korchunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. №5. С. 33-35.
10. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. Structure features and properties of high-alloy white irons // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. №5. С. 3-8.
11. Ji Y.H., Park J.J. Development of severe plastic deformation by various asymmetric rolling processes // *Materials Science and Engineering: A*. Vol. 499. 2009. P. 14-17.
12. Jianhua Jiang, Yi Ding, Fangqing Zuo, Aidang Shan. Mechanical properties and microstructures of ultrafine-grained pure aluminum by asymmetric rolling // *Scripta Materialia*. Vol. 60. 2009. P. 905-908.
13. Lorentz, Young Gun Ko. Microstructure evolution and mechanical properties of severely deformed Al alloy processed by differential speed rolling // *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 536S. 2012. P. S122-S125.



14. Cui Q., Ohori K. Grain refinement of high purity aluminum by asymmetric rolling // *Materials Science and Technology*. 2000. Vol. 16. P. 1095–1101.
15. Zuo F., Jiang J., Shan A. Shear deformation and grain refinement in pure Al by asymmetric rolling // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. Vol. 18. 2008. P. 774–777.
16. Bobor K., Hegedus Z., Gubicza J., Barkai I., Pekker P., Kralics G. Microstructure and mechanical properties of Al 7075 alloy processed by differential speed rolling // *Mechanical Engineering*. Vol. 56. 2012. P. 111–115.
17. Pesin A., Pustovoytov D. Influence of process parameters on distribution of shear strain through sheet thickness in asymmetric rolling // *Key Engineering Materials*. Vol. 622–623. 2014. P. 929–935.
18. Finite element simulation of shear strain in various asymmetric cold rolling processes / Pesin A., Pustovoytov D., Korchunov A., Wang K., Tang D., Mi Z. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. № 4 (48). С. 32–40.
19. Салганик В.М., Песин А.М. Асимметричная тонколистовая прокатка: развитие теории, технологии и новые решения. М.: МИСиС, 1997. 192 с.
20. Песин А.М. Моделирование и развитие процессов асимметричного деформирования для повышения эффективности листовой прокатки: дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск, 2003. 395 с.
21. Sverdlík M., Pesin A., Pustovoytov D., Perekhozhikh A. Numerical research of shear strain in an extreme case of asymmetric rolling // *Advanced Materials Research*. 2013. T. 742. С. 476–481.
22. Dyja H., Salganik W.M., Piesin A.M., Kawalek A. Asymetryczne walcowanie blach cienkich: teoria, technologia i nowe rozwiązania. Seria: Monografie nr 137. Wydawnictwo Politechniki Czestochowskiej. Czestochowa, 2008. 345 s.
23. Моделирование сдвиговых деформаций в предельном случае асимметричной тонколистовой прокатки / Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Перехожих А.А., Свердлик М.К. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. №1 (41). С. 65–68.
24. Боткин А.В. Научно-методологические основы проектирования процессов углового прессования: дис. ... д-ра техн. наук. Уфа, 2013. 282 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

SIMULATION OF TEMPERATURE FIELDS IN A DEFORMATION ZONE DURING ASYMMETRIC ROLLING OF ALUMINUM ALLOYS

**Pesin Alexander Moiseevich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)29-85-25. E-mail: pesin@bk.ru.

**Pustovoitov Denis Olegovich** – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)29-85-25. E-mail: pustovoitov\_den@mail.ru.

**Vafin Ruslan Karimovich** – Ph.D. (Eng.), research engineer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: vafinrk@mail.ru.

**Abstract.** Based on the FE mathematical simulation, a numerical research on patterns of metal deformation heating and temperature-field generation in a deformation zone during asymmetrical cold rolling of Al 99.5% pure aluminum, Al 5083 and Al 7075 alloys under ultra-high shear strain has been carried out. The authors have determined influence patterns of a contact-friction coefficient, rolling speed, radius of rolls, reduction ratio and strength properties of aluminum alloys on deformation heating temperature of rolled strips. The study results can be used when developing optimal conditions of asymmetric rolling of aluminum alloys under ultra-high shear strain to achieve ultrafine grain structure and high-strength properties.

**Keywords:** Asymmetric rolling, shear deformation, finite element method, severe plastic deformation, aluminum alloy, deformation heating.

References

1. Antipov V.V., Senatorova O.G., Tkachenko E.A., Vakhromov R.O. High-strength Al-Zn-Mg-Cu-alloys and light-Li-Al alloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment]. 2011, no. 9, pp. 27-33.
2. Elagin V.I. Ways of development of high-strength and heat-resistant structural aluminum alloys in the XXI century. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment]. 2007, no. 9, pp. 3-11.
3. Gun I.G., Mikhailovsky I.A., Osipov D.S., Kutsependik V.I., Salnikov V.V., Gun E.I., Smirnov A.V. Development, modeling and improvement of ball joint production processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1 (45), pp. 52-57.
4. Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun I.G., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. Creation and development of a theory of the metallurgy quality. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2003, no. 5 (45), pp. 67-69.
5. Zakirov D.M., Osipov D.S., Gun I.G., Sabadash A.V., Ovchinnikov S.V., Maistrenko V.V., Mezin I.Yu. Application of the logic of antonyms to the integrated analysis of automotive fasteners quality. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010, no. 4, pp. 57-62.
6. Gun I.G., Mikhailovsky I.A., Osipov D.S., Salnikov V.V. Comprehensive assessment of the through production technology effectiveness using the logic of antonyms as in the case of ball studs. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2005, vol. 1, no. 9, pp. 67-71.
7. Chukin M.V., Golubchik E.M., Gun G.S., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Chukin D.M., Matushkin A.N. Study of physical and mechanical properties and structure of new-generation multipurpose high-strength invar alloys. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1 (45), pp. 43-47.
8. Gun G.S., Mezin I.Yu., Rubin G. Sh., Minaev A.A., Nazaibekov A.B., Dyja Kh. Scientific research genesis in the field 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. 92-96.
9. Chukin M.V., Korchunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V. Nanodimensional structural part formation in high carbon steel by thermal and deformation processing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 5 (45), pp. 33-35.
10. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. Structural features 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), pp. 3-8.
11. Ji Y.H., Park J.J. Development of severe plastic deformation by various asymmetric rolling processes. *Materials Science and Engineering: A*. Vol. 499, 2009, pp. 14-17.
  12. Jianhua Jiang, Yi Ding, Fangqing Zuo, Aidang Shan. Mechanical properties and microstructures of ultrafine-grained pure aluminum by asymmetric rolling. *Scripta Materialia*. Vol. 60, 2009, pp. 905-908.
  13. Lorentz, Young Gun Ko. Microstructure evolution and mechanical properties of severely deformed Al alloy processed by differential speed rolling. *Zhurnal splavov i soedinenij* [Journal of Alloys and Compounds]. 2012, vol. 536S, pp. S122-S125.
  14. Cui Q, Ohori K. Grain refinement of high purity aluminum by asymmetric rolling. *Materialovedenie i tekhnologiya* [Materials Science and Technology]. 2000, vol. 16, pp. 1095-1101.
  15. Zuo F., Jiang J., Shan A. Shear deformation and grain refinement in pure Al by asymmetric rolling. *Sdelki tsvetnykh metallov obshchestva Kitaya* [Transactions of Nonferrous Metals Society of China]. 2008, vol. 18, pp. 774-777.
  16. Bobor K., Hegedus Z., Gubicza J., Barkai I., Pekker P., Krallics G. Microstructure and mechanical properties of Al 7075 alloy processed by differential speed rolling. *Mashinostroenie* [Mechanical Engineering]. 2012, vol. 56, pp. 111-115.
  17. Pesin A., Pustovoytov D. Influence of process parameters on distribution of shear strain through sheet thickness in asymmetric rolling. *Osnovnye Inzhenernye materialy* [Key Engineering Materials]. 2014, vol. 622-623, pp. 929-935.
  18. Pesin A., Pustovoytov D., Korchunov A., Wang K., Tang D., Mi Z. Finite element simulation of shear strain in various asymmetric cold rolling processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 4 (48), pp. 32-40.
  19. Salganik V.M., Pesin A.M. *Asimmetrichnaya tonkolistovaya prokatka: razvitie teorii, tekhnologii i novye resheniya* [Asymmetric rolling of a thin sheet: the development of theory, technology and new solutions]. Moscow: MISIS, 1997. 192 p.
  20. Pesin A.M. *Modelirovanie i razvitie protsessov asimmetrichnogo deformirovaniya dlya povysheniya effektivnosti listovoj prokatki* [Modeling and development of the processes of asymmetric deformation to improve sheet rolling]. D.Sc. dissertation. Magnitogorsk, 2003. 395 p.
  21. Sverdlik M., Pesin A., Pustovoytov D., Perekhozhikh A. Numerical research of shear strain in an extreme case of asymmetric rolling. *Rasshirenyy materialy issledovaniy* [Advanced Materials Research]. 2013, vol. 742, pp. 476-481.
  22. Dyla Kh., Salganik W.M., Pesin A.M., Kawalek A. *Asymetryczne walcowanie blach cienkich: teoria, technologia i nowe rozwiazania*. Seria: Monografie nr 137. Wydawnictwo Politechniki Czestochowskiej. Czestochowa, 2008. 345 p.
  23. Pustovoytov D.O., Pesin A.M., Perekhozhikh A.A., Sverdlik M.K. Simulation of shear strain in the limiting case of asymmetric sheet rolling. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 1 (41), pp. 65-68.
  24. Botkin A.V. *Nauchno-metodologicheskie osnovy proektirovaniya protsessov uglovogo pressovaniya* [Scientific and methodological foundations of design processes of angular pressing]. D.Sc. dissertation. Ufa, 2013. 282 p.

Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Вафин Р.К. Моделирование температурных полей в очаге деформации при асимметричной прокатке алюминиевых сплавов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 75–81.

Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Vafin R.K. Simulation of temperature fields in a deformation zone during asymmetric rolling of aluminum alloys. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 75–81.

УДК 621.789

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ЗЕРНА ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ ЧИСТОГО АЛЮМИНИЯ И СПЛАВА 7075\*

Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Сverdlik М.К.

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

**Аннотация.** В работе представлена математическая модель эволюции зерна и плотности дислокаций при холодной асимметричной прокатке чистого алюминия Al 99,5% и сплава 7075. Получены зависимости влияния эквивалентной и сдвиговой деформации на структуру алюминиевых сплавов. Показана сходимость результатов моделирования и экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** алюминий, асимметричная прокатка, сдвиговая деформация, математическое моделирование, интенсивная пластическая деформация, размер зерна, плотность дислокаций.

### Введение

Алюминий и его сплавы широко используются в качестве конструкционных материалов в авиакосмической, автомобильной и других отраслях промышленности вследствие их малой плот-

ности и высокой удельной прочности [1–10]. Традиционные подходы повышения прочностных свойств алюминиевых сплавов, основанные на модифицировании их химического состава легированием (Cu, Mg, Zn, Si, Li, Ag), а также на развитии методов термической и термомеханической обработки, практически исчерпаны [2], а использование при легировании дорогостоящих компонентов, например циркония или скандия, увеличивает се-

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-08-31143 мол а  
© Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Сverdlik М.К., 2015

бестоимость таких сплавов. Более эффективным путем дальнейшего повышения прочности и других эксплуатационных и технологических характеристик алюминиевых сплавов является формирование в их объеме ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры на основе применения методов интенсивной пластической деформации (ИПД).

По мнению ряда исследователей [11–22], одним из наиболее перспективных для промышленного применения методов ИПД являются процессы холодной асимметричной тонколистовой прокатки, основанные на целенаправленно создаваемой асимметрии за счет рассогласования скоростей рабочих валков, разницы диаметров, условий контактного трения и др. В ряде работ [14–18] экспериментально показано, что при асимметричной прокатке алюминия и его сплавов формируется УМЗ структура. Однако закономерности формирования такой структуры, а также свойств алюминиевых сплавов при холодной асимметричной прокатке мало изучены.

Целью данной работы является численное исследование и моделирование эволюции зерна и плотности дислокаций при холодной асимметричной прокатке чистого алюминия Al 99,5% и сплава 7075 в режиме ИПД.

### Материалы и методы исследования

В качестве материалов для моделирования были выбраны чистый алюминий Al 99,5% и термически упрочняемый сплав Al 7075. Чистый алюминий выбран в качестве модельного материала для того, чтобы исключить влияние вторичных фаз. Сплав 7075 интересен как реальный конструкционный материал, широко использующийся в промышленности.

Размер зерна и плотность дислокаций после холодной пластической деформации существенным образом влияют на свойства металлов и сплавов. Средний размер зерна  $D$  определяли в соответствии с моделью непрерывной динамической рекристаллизации металлов при ИПД, предложенной в работе [19], и адаптированной к процессу холодной асимметричной тонколистовой прокатки чистого алюминия Al 99,5% и сплава Al 7075:

$$D = \begin{cases} D_0, & \text{при } \varepsilon < \varepsilon_c, \\ D_0 - [D_0 - z_1 \exp(-z_2 \varepsilon)] \left[ 1 - \exp(-z_3 (\varepsilon - \varepsilon_c)^{z_4}) \right], & \text{при } \varepsilon \geq \varepsilon_c, \end{cases} \quad (1)$$

где  $D_0$  – начальный средний размер зерна, мкм;  $z_1, z_2, z_3, z_4$  – эмпирические коэффициенты, характеризующие изменение скорости протекания непрерывной динамической рекристаллизации с увеличением деформации;  $\varepsilon_c$  – пороговое значение деформации, являющееся мерой инкубационного периода, необходимого для формирования новых зерен;  $\varepsilon$  – эквивалентная деформация.

Если деформация меньше порогового значения, то при холодной прокатке средний размер зерна не меняется, но при этом зерна удлинняются вдоль направления прокатки, причем отношение длины зерна к его ширине коррелирует с макроскопической степенью деформации [23].

При достижении эквивалентной деформации порогового значения в материале инициируется прохождение непрерывной динамической рекристаллизации [19], при которой в материале создается пространственно-неоднородная дислокационная структура, фрагментирующая материал на сильно разориентированные субзерна.

Эквивалентную деформацию при асимметричной тонколистовой прокатке определяли по формуле [20]

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{4 \left( \ln \frac{h_0}{h_1} \right)^2 + (tg \varphi)^2}, \quad (2)$$

где  $h_0, h_1$  – толщина листа соответственно до и после асимметричной прокатки;  $\varphi$  – угол сдвига слоев металла.

Взаимосвязь угла сдвига  $\varphi$  и эквивалентной деформации, а также область реализации процесса асимметричной тонколистовой прокатки в режиме ИПД показаны на рис. 1.

Моделирование эволюции плотности дислокаций осуществляли на основе решения дифференциального уравнения дислокационной кинетики [24]:

$$\frac{d\rho}{d\gamma} = \left( \frac{\beta}{bD} + \frac{1}{b\lambda_m} + k_f \rho^{1/2} \right) - \left( k_a \rho + \frac{\rho}{\dot{\gamma} t_d} \right), \quad (3)$$

где  $\beta$  – коэффициент;  $b$  – вектор Бюргерса;  $D$  – средний размер зерна;  $\lambda_m$  – расстояние свободного пробега дислокаций;  $k_f$  – коэффициент, определяющий интенсивность размножения дислокаций на дислокациях леса;  $k_a$  – коэффициент аннигиляции винтовых дислокаций;  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвиговой деформации;  $t_d$  – характерное время аннигиляции.

Данное уравнение учитывает [24]: 1) влияние границ зерен на накопление дислокаций (первое слагаемое в правой части); 2) скорость накопления дислокаций за счет их размножения посредством механизма двойного поперечного скольжения винтовых дислокаций на препятствиях недеформационного (второе слагаемое) и деформационного (третье слагаемое) происхождения; 3) скорость аннигиляции винтовых участков дислокационных петель (четвертое слагаемое) и скорость аннигиляции решеточных дислокаций в границах зерен (пятое слагаемое).

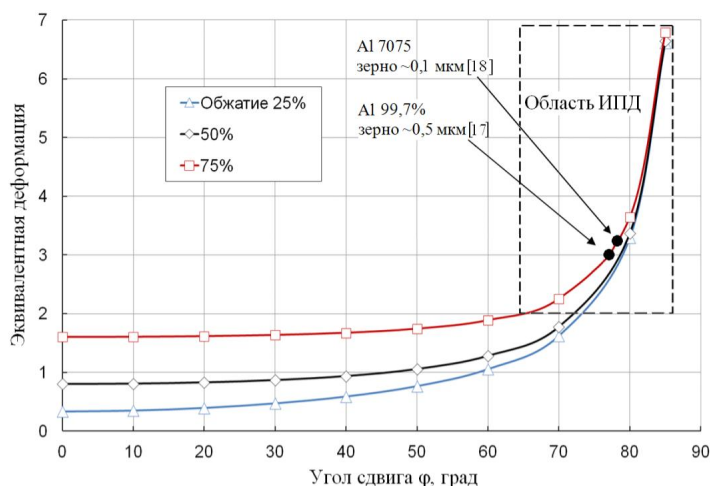


Рис. 1. Взаимосвязь угла сдвига и эквивалентной деформации при асимметричной тонколистовой прокатке

Для чистых металлов  $\frac{1}{\lambda_m} = 0$  [24]. Тогда для

алюминия Al 99,5% в отсутствии диффузионных механизмов аннигиляции дислокаций в границах и объеме зерен, а также с учетом того, что в правой части уравнения (3) доминирует третье слагаемое, имеем следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\rho}{d\gamma} = k_f \rho^{1/2} - k_a \rho. \quad (4)$$

Интегрирование уравнения (4) позволило получить выражение для эволюции плотности дислокаций в зависимости от сдвиговой деформации  $\gamma$  при холодной асимметричной прокатке чистого алюминия Al 99,5%:

$$\rho = \left[ \rho_0^{1/2} \exp\left(-\frac{k_a}{2}\gamma\right) + \frac{k_f}{k_a} \left(1 - \exp\left(-\frac{k_a}{2}\gamma\right)\right) \right]^2, \quad (5)$$

где  $\gamma = \text{tg}\phi$  – сдвиговая деформация при асимметричной тонколистовой прокатке;  $\rho_0$  – начальная плотность дислокаций.

Сплав 7075 является термически упрочняемым, следовательно, в уравнении (3) можно принять, что доминирующим фактором скорости накопления дислокаций является их размножение посредством механизма двойного поперечного скольжения на препятствиях недеформационного происхождения (упрочняющие частицы), т.е. имеем следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\rho}{d\gamma} = \frac{1}{b\lambda_m} - k_a \rho. \quad (6)$$

Интегрирование уравнения (6) позволило получить выражение для эволюции плотности дислокаций в зависимости от сдвиговой деформации  $\gamma$  при холодной асимметричной прокатке термически упрочняемого алюминиевого сплава Al 7075:

$$\rho = \rho_0 \exp(-k_a \gamma) + \frac{1}{b\lambda_m k_a} (1 - \exp(-k_a \gamma)). \quad (7)$$

В табл. 1 даны значения величин, использованных при расчетах по формулам (1), (2), (5), (7). Значения параметров, для которых не указана ссылка на источник, были приняты в рамках данной работы.

Таблица 1  
Значения величин, использованных при расчетах

Параметр	Материал	
	Al 99,5%	Al 7075
$h_0, \text{мм}$	10	10
$h_1, \text{мм}$	2,5	2,5
$D_0, \text{мкм}$	29 [19]	18 [23]
$Z_1$	0,50	0,09
$Z_2$	0,043	0,043
$Z_3$	6,751	6,751
$Z_4$	1,170	1,170
$\epsilon_c$	2,0	2,0
$\rho_0, \text{м}^{-2}$	$1 \times 10^9$ [19]	$1 \times 10^9$ [23]
$k_f$	$0,0357 \times 10^9$	–
$k_a$	2	2
$\lambda_m, \text{м}$	–	$3,15 \times 10^{-6}$
$b, \text{м}$	$0,28 \times 10^{-9}$ [24]	$0,28 \times 10^{-9}$ [24]

### Результаты моделирования и их обсуждение

По формулам (1) и (2) при значениях параметров (см. табл. 1) выполнили исследование влияния эквивалентной деформации на средний размер зерна при асимметричной прокатке чистого алюминия Al 99,5% и сплава Al 7075. На основе математического моделирования получено, что наиболее интенсивное измельчение зерна происходит при изменении эквивалентной деформации в интервале от 2,0 до 3,5 (рис. 2). Размер зерна уменьшается при этом с 29 до 0,43 мкм для чистого алюминия Al 99,5% и с 18 до 0,078 мкм для сплава Al 7075. Дальнейшее увеличение деформации (до 7) не приводит к существенному измельчению структуры.

Для обеспечения при асимметричной прокатке листа с обжатию 75% эквивалентной деформации на уровне 2,0–3,5 необходимо, чтобы угол сдвига слоев металла составил 65–80 град. В работе [20] показано, что такой сдвиг может быть достигнут при асимметричной прокатке с

рассогласованием скоростей валков  $\Delta V$ , равным степени обжатия, т.е.  $\Delta V = 50\%$  (при прокатке за два прохода) или  $\Delta V = 75\%$  (при прокатке за один проход).

Более мелкое зерно, полученное при моделировании для сплава 7075, может говорить о том, что наличие легирующих элементов и упрочняющих частиц играет важную роль в измельчении структуры. Это подтверждается результатами экспериментов, выполненных в работах [17] и [18], где при асимметричной прокатке чистого алюминия было получено зерно размером  $\sim 0,5$  мкм [17], а при асимметричной прокатке сплава 7075 – зерно размером  $\sim 0,1$  мкм [18].

Оценку изменения плотности дислокаций в зависимости от угла сдвига при асимметричной тонколистовой прокатке проводили по формуле (5) для чистого алюминия Al 99,5% и по формуле (7) для сплава Al 7075. Получено (рис. 3), что при величине угла сдвига 65–80 град для чистого алюминия плотность дислокаций составляет  $2,5 \times 10^{14}$ – $3,2 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$ , а для сплава 7075  $\sim 5,6 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$ , что вполне согласуется с известными экспериментальными данными относительно плотности дислокаций в алюминиевых сплавах, подвергнутых ИПД [18, 25]. При этом характерно, что наиболее интенсивное увеличение плотности дислокаций наблюдается при увеличении угла сдвига от 0 до 75 град для чистого алюминия и от 0 до 60 град – для сплава 7075 (см. рис. 3). Дальнейшее увеличение деформации не приводит к существенному изменению плотности дислокаций.

Адекватность результатов математического моделирования оценивали сравнением расчетных и экспериментальных [17, 18] данных (табл. 2).

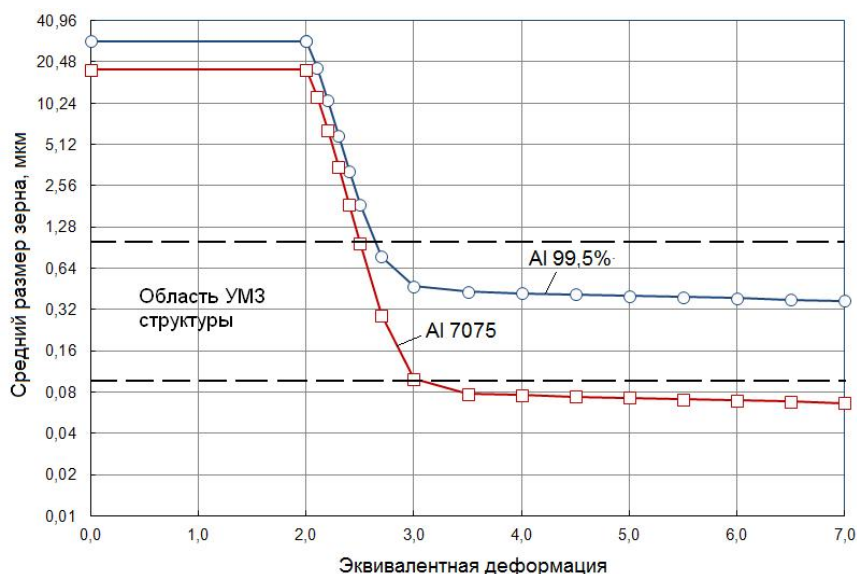


Рис. 2. Влияние эквивалентной деформации на средний размер зерна при асимметричной прокатке чистого алюминия Al 99,5% и сплава Al 7075

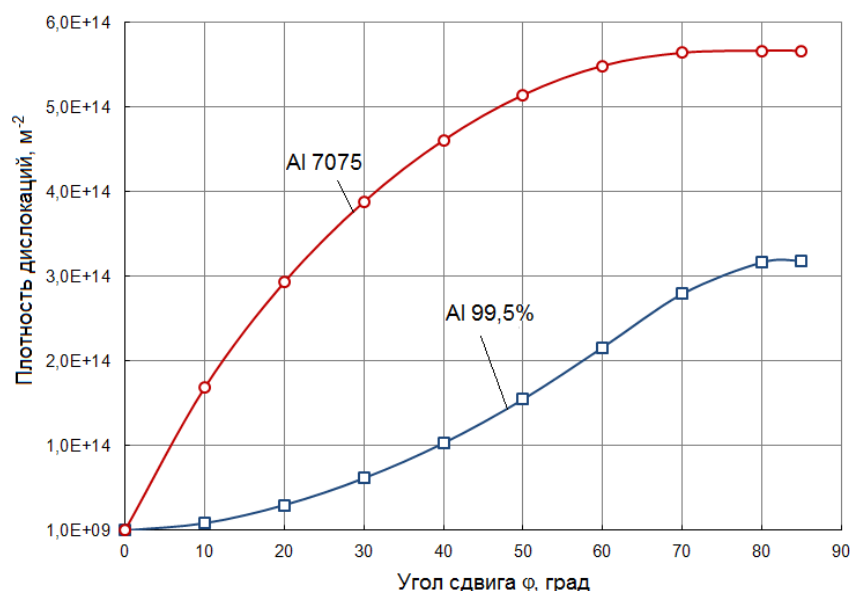


Рис. 3. Влияние угла сдвига на изменение плотности дислокаций при асимметричной прокатке чистого алюминия Al 99,5% и сплава Al 7075

Таблица 2  
Сравнение расчетных и экспериментальных значений

Параметр	Материал			
	Al 99,5%		Al 7075	
	Расчетное значение	Экспериментальные данные [17]	Расчетное значение	Экспериментальные данные [18]
Средний размер зерна D, мкм	0,470	0,500	0,110	0,108±0,010
Плотность дислокаций ρ, м <sup>-2</sup>	3,0×10 <sup>14</sup>	–	5,6×10 <sup>14</sup>	(5,5±0,5)×10 <sup>14</sup>



## Выводы

1. Развита математическая модель эволюции зерна и плотности дислокаций при холодной асимметричной прокатке чистого алюминия Al 99,5% и сплава 7075 в режиме ИПД.

2. На основе математического моделирования получено, что наиболее интенсивное измельчение зерна происходит при изменении эквивалентной деформации в интервале от 2,0 до 3,5. Размер зерна уменьшается при этом с 29 до 0,43 мкм для чистого алюминия Al 99,5% и с 18 до 0,078 мкм для сплава Al 7075.

3. Для обеспечения при асимметричной прокатке листа с обжатием 75% эквивалентной деформации на уровне 2,0–3,5 необходимо, чтобы угол сдвига слоев металла составил 65–80 град.

4. При величине угла сдвига 65–80 град для чистого алюминия расчетное значение плотности дислокаций составляет  $2,5 \times 10^{14}$ – $3,2 \times 10^{14}$  м<sup>-2</sup>, а для сплава 7075– $5,6 \times 10^{14}$  м<sup>-2</sup>.

5. Показана сходимость результатов моделирования и экспериментальных данных.

## Список литературы

1. Высокопрочные Al-Zn-Mg-Cu-сплавы и легкие Al-Li-сплавы / Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2011. №9. С. 27–33.
2. Елагин В.И. Пути развития высокопрочных и жаропрочных конструкционных алюминиевых сплавов в XXI столетии // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2007. №9. С. 3–11.
3. Разработка, моделирование и совершенствование процессов производства шаровых шарниров автомобилей / Гун И.Г., Михайловский И.А., Осипов Д.С., Куцендик В.И., Сальников В.В., Гун Е.И., Смирнов А.В. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. №1 (45). С. 52–57.
4. Комплексная оценка результативности сквозных технологий производства с использованием логики антонимов на примере шаровых пальцев / Гун И.Г., Михайловский И.А., Осипов Д.С., Сальников В.В. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2005. №1(9). С. 67–71.
5. Metallurgy qualimetry theory design and development / Gun G.S., Rubin G. Sh., Chukin M.V., Gun I.G., Mezin I.U., Korchnunov A.G. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. № 5. С. 67–69.
6. Исследование физико-механических свойств и структуры высокопрочных многофункциональных сплавов инварного класса нового поколения / Чукин М.В., Голубчик Э.М., Гун Г.С., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Чукин Д.М., Матушкин А.Н. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. № 1 (45). С. 43–47.
7. Генезис научных исследований в области качества металлопродукции / Гун Г.С., Мезин И.Ю., Рубин Г.Ш., Минаев А.А., Назайбеков А.Б., Дьях Х. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. № 1 (45). С. 92–96.
8. Nanodimensional structural part formation in high carbon steel by thermal and deformation processing / Chukin M.V., Korchnunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. № 5 (45). С. 33–35.
9. Finite element simulation of shear strain in various asymmetric cold rolling processes / Pesin A., Pustovoytov D., Korchnunov A., Wang K., Tang D., Mi Z. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. № 4 (48). С. 32–40.
10. Научная деятельность ГОУ ВПО «МГТУ» в условиях развития нанотехнологий / Чукин М.В., Колокольцев В.М., Гун Г.С., Салганик В.М., Платов С.И. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2009. № 2. С. 55–59.
11. Ji Y.H., Park J.J. Development of severe plastic deformation by various asymmetric rolling processes // *Materials Science and Engineering: A*. Vol. 499. 2009. P. 14–17.
12. Li Y.H., Park J.J., Kim W.J. Finite element analysis of severe deformation in Mg-3Al-1Zn sheets through differential-speed rolling with a high speed ratio // *Materials Science and Engineering: A*. Vol. A. 2007. P. 454–455.
13. Zhiming Li, Liming Fu, Bin Fu, Aidang Shan. Effects of annealing on microstructure and mechanical properties of nano-grained titanium produced by combination of asymmetric and symmetric rolling // *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 558. 2012. P. 309–318.
14. Jianhua Jiang, Yi Ding, Fangqing Zuo, Aidang Shan. Mechanical properties and microstructures of ultrafine-grained pure aluminum by asymmetric rolling // *Scripta Materialia*. Vol. 60. 2009. P. 905–908.
15. Lorentz, Young Gun Ko. Microstructure evolution and mechanical properties of severely deformed Al alloy processed by differential speed rolling // *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 536S. 2012. P. S122–S125.
16. Cui Q, Ohori K. Grain refinement of high purity aluminum by asymmetric rolling // *Materials Science and Technology*. 2000. Vol. 16. P. 1095–1101.
17. Zuo F., Jiang J., Shan A. Shear deformation and grain refinement in pure Al by asymmetric rolling // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. Vol. 18. 2008. P. 774–777.
18. Bobor K., Hegedus Z., Gubicza J., Barkai I., Pekker P., Krallics G. Microstructure and mechanical properties of Al 7075 alloy processed by differential speed rolling // *Mechanical Engineering*. Vol. 56. 2012. P. 111–115.
19. Hallberg H. Influence of Process Parameters on Grain Refinement in AA1050 Aluminum during Cold Rolling // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2013. P. 260–272.
20. Pesin A., Pustovoytov D. Influence of process parameters on distribution of shear strain through sheet thickness in asymmetric rolling // *Key Engineering Materials*. Vol. 622–623. 2014. P. 929–935.
21. Sverdlik M., Pesin A., Pustovoytov D., Perekhozhikh A. Numerical research of shear strain in an extreme case of asymmetric rolling // *Advanced Materials Research*. 2013. T. 742. С. 476–481.
22. Моделирование сдвиговых деформаций в предельном случае асимметричной тонколистовой прокатки / Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Перехожих А.А., Сverdлик М.К. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. № 1 (41). С. 65–68.
23. Таджалли М., Худа З., Масжуки Х.Х. Влияние условий деформации и рекристаллизации на поведение алюминиевого сплава 7075 при растяжении // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2011. №4. С. 15–18.
24. Малыгин Г.А. Пластичность и прочность микро- и нанокристаллических материалов // *Физика твердого тела*. 2007. Т. 49. С. 961–982.
25. Мурашкин М.Ю., Кильмаметов А.Р., Валиев Р.З. Особенности структуры и механические свойства алюминиевого сплава 1570, подвергнутого интенсивной пластической деформации // *Физика металлов и металловедение*. 2008. Т. 106. №1. С. 93–99.

## MATHEMATICAL SIMULATION OF GRAIN EVOLUTION DURING ASYMMETRIC ROLLING OF PURE ALUMINUM AND 7075 ALLOY

**Pustovoitov Denis Olegovich** – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)29-85-25. E-mail: pustovoitov\_den@mail.ru.

**Pesin Alexander Moiseevich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)29-85-25. E-mail: pesin@bk.ru.

**Sverdlik Mikhail Konstantinovich** – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mikhail-sverdlik@hotmail.com.

**Abstract.** The article presents a mathematical model of grain evolution and dislocation density during cold asymmetric rolling of pure Al 99.5% aluminum and 7075 alloy. The effect of equivalent and shear strain on the aluminum alloy structure has been found. Convergence of simulation results and experimental information has been demonstrated.

**Keywords:** Aluminum, asymmetric rolling, shear strain, mathematical simulation, severe plastic deformation, grain size, dislocation density.

### References

1. Antipov V.V., Senatorova O.G., Tkachenko E.A., Vakhromov R.O. High-strength Al-Zn-Mg-Cu-alloys and light-Li-Al alloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment], 2011, no. 9, pp. 27-33.
2. Elagin V.I. Ways of development of high-strength and heat-resistant structural aluminum alloys in the XXI century. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment], 2007, no. 9, pp. 3-11.
3. Gun I.G., Mikhailovsky I.A., Osipov D.S., Kutsependik V.I., Salnikov V.V., Gun E.I., Smirnov A.V. Development, modeling and improvement of ball joint production processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no.1 (45), pp. 52-57.
4. Gun I.G., Mikhailovsky I.A., Osipov D.S., Salnikov V.V. Comprehensive assessment of the through production technology effectiveness using the logic of antonyms as in the case of ball studs. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2005, vol. 1, no. 9, pp. 67-71.
5. Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun I.G., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. Creation and development of a theory of the metalurgy qualimetry. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2003, no. 5, 67 p.
6. Chukin M.V., Golubchik E.M., Gun G.S., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Chukin D.M., Matushkin A.N. Study of physical and mechanical properties and structure of new-generation multipurpose high-strength invar alloys. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1 (45), pp. 43-47.
7. Gun G.S., Mezin I.Yu., Rubin G. Sh., Minaev A.A., Nazaibekov A.B., Dya Kh. Scientific research genesis in the field 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. 92-96.
8. Chukin M.V., Korchunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V. Nanodimensional structural part formation in high carbon steel by thermal and deformation processing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 5 (45), pp. 33-35.
9. Pesin A., Pustovoitov D., Korchunov A., Wang K., Tang D., Mi Z. Finite element simulation of shear strain in various asymmetric cold rolling processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 4 (48), pp. 32-40.
10. Chukin M.V., Kolokoltsev V.M., Gun G.S., Salganik V.M., Platon S.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University scientific activities with the nanotechnology development. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2009, no. 2, pp. 55-59.
11. Ji Y.H., Park J.J. Development of severe plastic deformation by various asymmetric rolling processes. *Materials Science and Engineering: A*. Vol. 499, 2009, pp. 14-17.
12. Li Y.H., Park J.J., Kim W.J. Finite element analysis of severe deformation in Mg-3Al-1Zn sheets through differential-speed rolling with a high speed ratio. *Materials Science and Engineering: A*. Vol. A. 2007, pp. 454-455.
13. Zhiming Li, Liming Fu, Bin Fu, Aidang Shan. Effects of annealing on microstructure and mechanical properties of nano-grained titanium produced by combination of asymmetric and symmetric rolling. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 558, 2012, pp. 309-318.
14. Jianhua Jiang, Yi Ding, Fangqing Zuo, Aidang Shan. Mechanical properties and microstructures of ultrafine-grained pure aluminum by asymmetric rolling. *Scripta Materialia*. 2009, vol. 60, pp. 905-908.
15. Lorentz, Young Gun Ko. Microstructure evolution and mechanical properties of severely deformed Al alloy processed by differential speed rolling. *Zhurnal splavov i soedinenij* [Journal of Alloys and Compounds]. 2012, vol. 536S, pp. S122-S125.
16. Cui Q, Ohori K. Grain refinement of high purity aluminum by asymmetric rolling. *Materialovedenie i tekhnologiya* [Materials Science and Technology]. 2000, vol. 16, pp. 1095-1101.
17. Zuo F., Jiang J., Shan A. Shear deformation and grain refinement in pure Al by asymmetric rolling. *Sdelki tsvetnykh metallov obshchestva Kitaya* [Transactions of Nonferrous Metals Society of China]. 2008, vol.18, pp. 774-777.
18. Bobor K., Hegedus Z., Gubicza J., Barkai I., Pekker P., Krallics G. Microstructure and mechanical properties of Al 7075 alloy processed by differential speed rolling. *Mashinostroenie* [Mechanical

- Engineering]. 2012, vol. 56, pp. 111-115.
19. Hallberg H. Influence of Process Parameters on Grain Refinement in AA1050 Aluminum during Cold Rolling. *Mezhdunarodnyj zhurnal mekhanicheskikh nauk* [International Journal of Mechanical Sciences], 2013. pp. 260-272.
  20. Pesin A., Pustovoytov D. Influence of process parameters on distribution of shear strain through sheet thickness in asymmetric rolling. *Osnovnye Inzhenerye materialy* [Key Engineering Materials]. 2014, vol. 622-623, pp. 929-935.
  21. Sverdlik M., Pesin A., Pustovoytov D., Perekhozhikh A. Numerical research of shear strain in an extreme case of asymmetric rolling. *Rasshirenyj materialy issledovanij* [Advanced Materials Research]. 2013, vol. 742, pp. 476-481.
  22. Pustovoytov D.O., Pesin A.M., Perekhozhikh A.A., Sverdlik M.K. Simulation of shear strain in the limiting case of asymmetric sheet rolling. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013. No 1 (41). – PP. 65-68.
  23. Tadgally M., Huda Z., Masguki H.H. Influence of deformation conditions and recrystallization on behavior of 7075 aluminum alloy under tension. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment]. 2011, no. 4, pp. 15-18.
  24. Malignin G.A. Plasticity and strength of micro- and nanocrystalline materials. *Fizika tverdogo tela* [Solid State Physics]. 2007, vol. 49, pp. 961-982.
  25. Murashkin M.Yu., Kilmametov A.R., Valiev R.Z. Structural features and mechanical properties of 1570 aluminum alloy exposed to severe plastic deformation. *Fizika metallov i metallovedenie* [The Physics of Metals and Metallography]. 2008, vol. 106, no. 1, pp. 93-99.

---

Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Сverdлик М.К. Математическое моделирование эволюции зерна при асимметричной прокатке чистого алюминия и сплава 7075 // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 81–87.

Pustovoytov D.O., Pesin A.M., Sverdlik M.K. Mathematical simulation of grain evolution during asymmetric rolling of pure aluminum and 7075 alloy. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 81–87.

---

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 621.785:621.771.23-022.532

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА\*

Полецков П.П., Гущина М.С., Бережная Г.А., Алексеев Д.Ю., Набатчиков Д.Г.

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

**Аннотация.** Представлены результаты комплексных исследований высокопрочных Cr-Ni-Mo-V- сталей. Показано влияние температуры нагрева под закалку и температуры отпуска на формирование структуры и механических свойств исследуемой высокопрочной низколегированной листовой стали. Определены ударная вязкость, твердость экспериментальных образцов и их изменение при различных температурах закалки и отпуска. Результаты исследований могут быть полезны, в частности, при выборе оптимальных режимов термической обработки с целью получения проката с высокими прочностными свойствами при сохранении пластичности и вязкости на достаточном уровне.

**Ключевые слова:** металлоемкость, надежность, высокопрочная сталь, физическое моделирование, закалка, отпуск, микроструктура, твердость, ударная вязкость.

### Введение

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 мировом рынке, а также обороноспособность государства [1–2].

Снижение металлоемкости конструкций – одна из главных задач машиностроения. Эффективное снижение веса машин и конструкций сопровождается повышением грузоподъемности и маневренности, улучшением экологичности из-за меньшего расхода топлива и уплотнения грунта, снижением себестоимости вследствие меньшего объема металла и сварочных материалов.

Реализация указанных тенденций возможна благодаря созданию специальных сталей высокой

прочности и твердости, обладающих достаточной пластичностью, ударной вязкостью [3, 4]. Наиболее простым решением является применение дополнительного легирования базовых композиций сталей. Однако использование дорогостоящих легирующих элементов существенно повышает стоимость стали, что делает применение таких материалов экономически нецелесообразным.

Современная концепция создания высокопрочных сталей заключается в микролегировании сталей в сочетании с вариацией режимов термической обработки (закалка + отпуск) для получения заданного уровня механических свойств (рис. 1) [5–6].

**Цель работы** – исследование влияния температуры закалки и отпуска на механические свойства высокопрочного листового проката.

Для этого была проведена серия лабораторных экспериментов на оборудовании, имитирующем реальные процессы производства стали и проката ООО «Термодеформ-МГТУ», и центра коллективного пользования научным оборудованием «Научно-исследовательский институт наносталей» при ФГБОУ ВПО «МГТУ», позволяющем осуществлять поиск технологических режимов производства новых высокопрочных сталей и листового проката, предназначенных для импортозамещения [7–9].

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

© Полецков П.П., Гущина М.С., Бережная Г.А., Алексеев Д.Ю., Набатчиков Д.Г., 2015



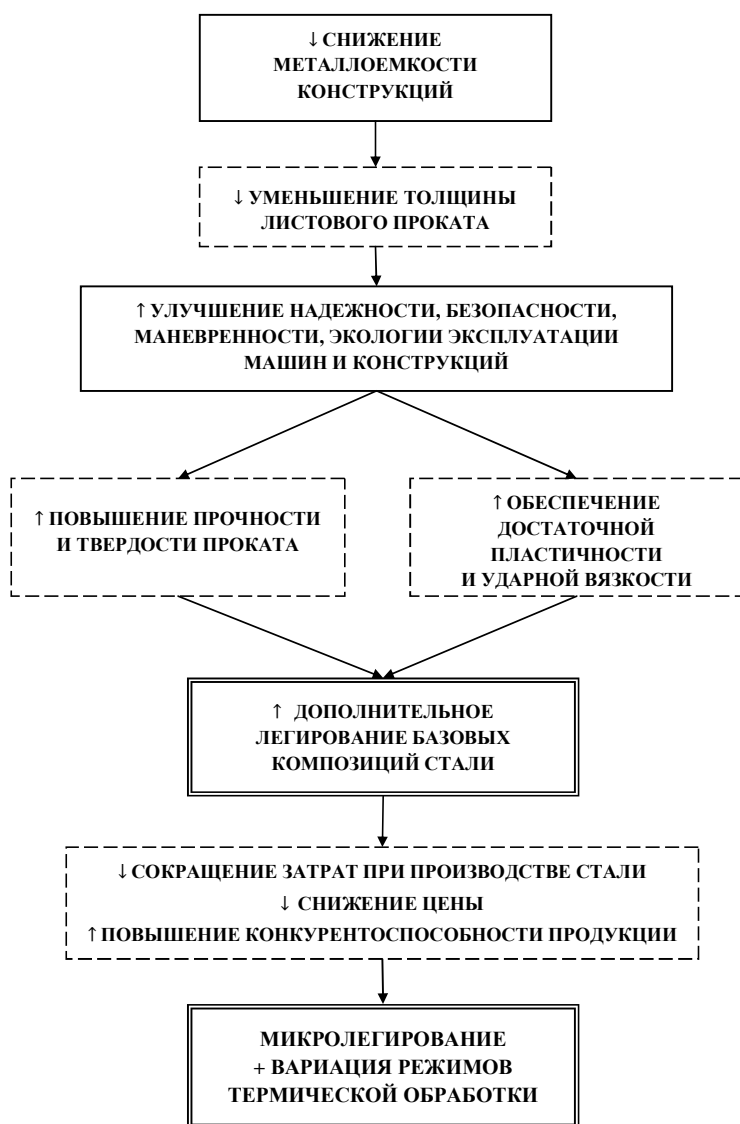


Рис. 1. Концепция создания высокопрочных сталей

**Методика проведения исследований**

Предварительно были выплавлены слитки из среднеуглеродистой низколегированной стали с системой легирования Cr–Ni–Mo–V (см. таблицу).

**Химический состав экспериментальных сталей**

Массовая доля элементов, %, не более							
C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Прочие
0,30	0,4	1,0	0,010	0,008	0,4	1,2	Cr, Cu, V, Nb, Ti, B

Полученные слитки нагревали в камерной печи. Далее осуществляли обжатие слитков на прессе и на реверсивном стане горячей прокатки 500 «ДУО». Слитки прокатывали до толщины 6 мм. Полученные раскаты охлаждали на воздухе.

Нагрев под закалку осуществляли в диапазоне температур от 850 до 1040°С, в качестве охлажда-

ющей среды использовали воду.

Отпуск производили с нагревом в диапазоне температур 200–600°С с последующим охлаждением на воздухе.

После термической обработки проводили испытания на твердость и ударный изгиб.

Испытание на твердость HRC проводили в соответствии с ГОСТ 9013, испытание на твердость HBW – в соответствии с ГОСТ 9012, испытания на ударный изгиб образцов с V-образным надрезом – при температуре +20 и –40°С в соответствии с ГОСТ 9454.

**Результаты исследований**

Влияние температуры закалки на твердость высокопрочного листового проката представлено в виде графиков (рис. 2).

По результатам проведенного эксперимента сделали вывод о том, что для достижения максимальной твердости оптимальная температура нагрева под закалку исследуемой стали находится в диапазоне 980–1020°С [10]. При таком нагреве получают структуру аустенита, а в результате охлаждения со скоростью выше критической – мартенсита. Балл мартенсита изменяется в диапазоне от 4 до 7 (рис. 3).

Результаты испытаний на ударный изгиб свидетельствуют о том, что с повышением температуры закалки от 850 до 1000°С вязкостные свойства высокопрочных Cr–Ni–Mo–V-сталей ухудшаются – работа удара уменьшается на 5–8 Дж (рис. 4).

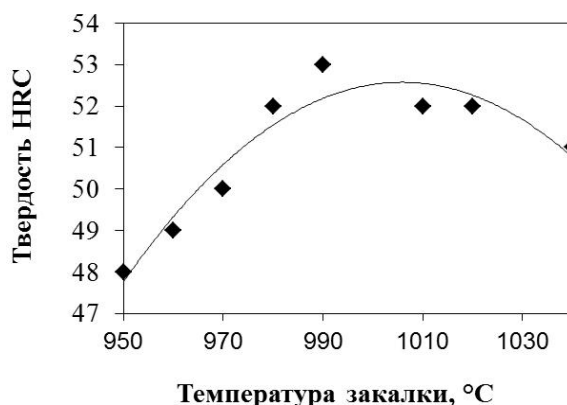


Рис. 2. Влияние температуры нагрева под закалку на твердость высокопрочного листового проката из сталей на основе системы легирования Cr–Ni–Mo–V

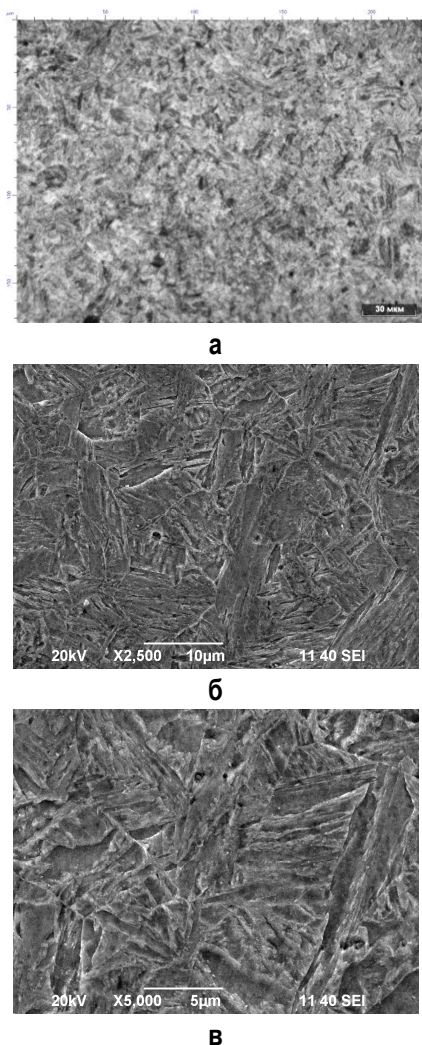


Рис. 3. Микроструктура исследуемых образцов высокопрочной Cr-Ni-Mo-V-стали после закалки: а –  $\times 500$ ; б –  $\times 2500$ ; в –  $\times 5000$

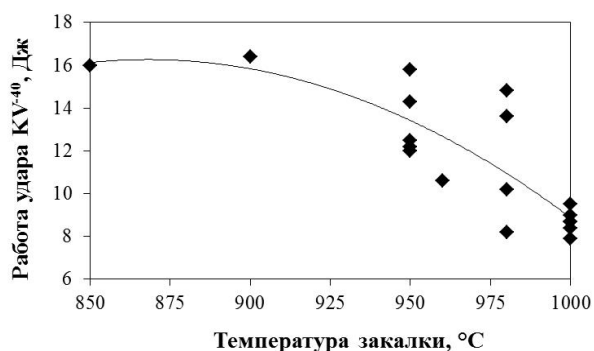


Рис. 4. Зависимость работы удара  $KV^{-40}$  от температуры закалки высокопрочной Cr-Ni-Mo-V-стали

Далее выполнены исследования влияния отпуска на твердость и ударную вязкость высокопрочной низколегированной стали с химическим составом в соответствии с таблицей.

В зависимости от температуры отпуска получены сорбитная, троосто-сорбитная, трооститная и мартенситная структуры с различными свойствами (рис. 5, 6).

Результаты исследований показали, что с повышением температуры отпуска от 200 до 600°C твердость стали снижается на 180 НВ (см. рис. 5), ударная вязкость увеличивается на 80 Дж/см<sup>2</sup>.

По графику, приведенному на рис. 6, видно, что при отпуске в температурном интервале 250–400°C развивается необратимая отпускная хрупкость. Ударная вязкость закаленной стали после отпуска в этом интервале меньше, чем после отпуска ниже 250°C. Следовательно, «средний» отпуск для высокопрочной стали не рекомендуется.

При отпуске в интервале температур 450–600°C не наблюдается провалов по ударной вязкости, которые могли бы свидетельствовать о склонности исследуемых сталей к обратимой отпускной хрупкости, что делает возможным проведение высокого отпуска в широком диапазоне температур на воздухе без резкого снижения ударной вязкости.

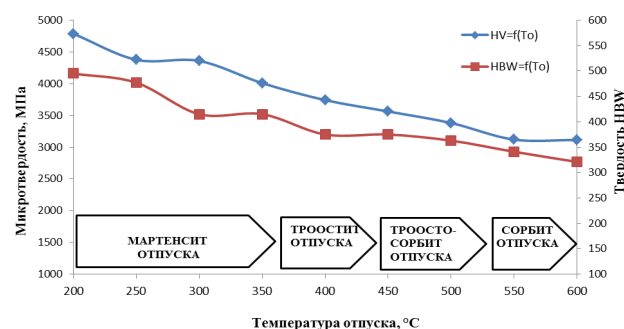


Рис. 5. Влияние температуры отпуска на микроструктуру и твердость экспериментальных образцов высокопрочной стали

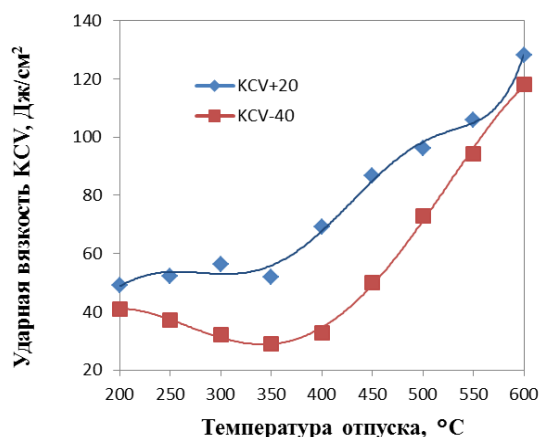


Рис. 6. Влияние температуры отпуска на ударную вязкость закаленной низколегированной Cr-Ni-Mo-V стали

### Заключение

На основании экспериментальных данных выявлены закономерности изменения твердости и ударной вязкости высокопрочных Cr-Ni-Mo-V сталей в зависимости от температуры нагрева под закалку и температуры отпуска.

Полученные данные позволяют оптимизировать процессы термической обработки высокопрочных сталей для конкретных условий применения.

### Список литературы

1. Минэкономразвития России. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года. URL: <http://www.economy.gov.ru/mined/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/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_165502/)
3. Основные виды наноструктурированного высокопрочного листового проката и принципиальная схема его производства / М.В. Чукин, В.М. Салганик, П.П. Полецков, Г.А. Бережная, М.С. Гущина, С.В. Денисов, П.А. Стеканов, Д.Ю. Алексеев // XVI International Scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering». A collective monograph edited by Henryk Radomak, Jaroslaw Boryca. Series: Monografie Nr 48. Częstochowa. 2015. P. 148–151.
4. Анализ технических требований, предъявляемых к наноструктурированному высокопрочному листовому прокату / М.В. Чукин, В.М. Салганик, П.П. Полецков, Г.А. Бережная, М.С. Гущина, А.С. Кузнецова, Д.Ю. Алексеев // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2014. №2. С. 19–28.
5. Meyer Lothar Werner, Frank Pursche. Modern high strength low alloyed steels // Proceedings of the 1st International Conference about Recent Trends in Structural Materials COMAT 2010. 2010. P. 13–18.
6. Особенности получения наноструктурированного высокопрочного листового проката / В.М. Салганик, П.П. Полецков, М.С. Гущина, Г.А. Бережная, А.С. Кузнецова, П.А. Стеканов, Д.Ю. Алексеев // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2015. №1. С. 27–30.
7. Научно-производственный комплекс «Термодеформ» для создания новых технологий / В.М. Салганик, П.П. Полецков., М.О. Артамонова и др. // Сталь. 2014. №4. С. 104–107.
8. Физическое моделирование процессов производства горячекатаного листа с уникальным комплексом свойств / В.М. Салганик, С.В. Денисов, П.П. Полецков, П.А. Стеканов, Г.А. Бережная, Д.Ю. Алексеев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 3. С. 37–39.
9. Научная деятельность ГОУ ВПО «МГТУ» в условиях развития нанотехнологий / М.В. Чукин, В.М. Колокольцев, Г.С. Гун, В.М. Салганик, С.И. Платов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. № 2. С. 55–59.
10. Исследование влияния температуры нагрева при закалке на механические свойства низколегированной высокопрочной стали / В.М. Салганик, П.П. Полецков, Г.А. Бережная, М.С. Гущина, Д.Ю. Алексеев // Производство проката. 2015. №5. С. 32–37.

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

#### EFFECT OF HEAT TREATMENT CONDITIONS ON MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH ROLLED STEEL SHEET

**Poletskov Pavel Petrovich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)29-85-25. E-mail: [pavel\\_poletskov@mail.ru](mailto:pavel_poletskov@mail.ru).

**Gushchina Marina Sergeevna** – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Berezhnaya Galina Andreevna** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [galina\\_1609@mail.ru](mailto:galina_1609@mail.ru).

**Alekseev Daniil Yurievich** – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

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

**Abstract.** The article presents the results of a comprehensive study of high-strength Cr-Ni-Mo-V steels. The authors show the effect of heating temperature of quenching and tempering temperature on structuring and mechanical-property forming of high-strength low-alloy sheet steel. Impact strength and hardness of test samples and their alteration at different quenching-tempering temperatures have been determined. The results of the study can be applied in selecting optimal heat treatment conditions to obtain rolled products of

high strength at conserving ductility and viscosity at an adequate level.

**Keywords:** Specific consumption of metal, reliability, high-strength steel, physical simulation, quenching, tempering, microstructure, hardness, impact strength.

#### References

1. *Minjekonomrazvitija Rossii. Prognoz dolgosrochnogo social'no-jekonomicheskogo razvitija Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda* [Ministry of Economic Development of the Russian Federation.

- Anticipated long-term social and economic development of the Russian Federation for the period until 2030]. Available at: <http://www.economy.gov.ru/minrec/activity/sections/macro/prognoz>.
2. *Strategija razvitiya chernoj metallurgii Rossii na 2014 - 2020 gody i na perspektivu do 2030 goda: prikaz Minpromtorga Rossii ot 05.05.2014 № 839* [Development strategy of Russian ferrous metallurgy through 2014 till 2020 and for further extension up to 2030: Decree of the Ministry of Industry and Trade of Russia of 05 May 2014 No. 839]. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_165502/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_165502/)
  3. Chukin M.V., Salganik V.M., Poletskov P.P., Berezhnaya G.A., Gushchina M.S., Denisov S.V., Stekanov P.A., Alekseev D.Y. Main sorts of high-strength nanostructured steel sheet and its production flow chart. *XVI International Scientific conference on New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering*. A collective monograph edited by Henryk Radomiak, Jarosław Boryca. Series: Monografie Nr 48. Częstochowa, 2015, pp. 148-151.
  4. Chukin M.V., Salganik V.M., Poletskov P.P., Berezhnaya G.A., Gushchina M.S., Kuznetsova A.S., Alekseev D.Y. *Analiz tehniceskikh trebovanij, predjavljajemyh k nanostrukturirovannomu vysokoprochnomu listovomu prokату* [Analysis of technical requirements applicable to high-strength nanostructured sheet steel]. *Obrabotka sploshnyh i sloistyh materialov* [Processing of solid and laminate materials]. 2014, no. 2, pp. 19-28.
  5. Meyer Lothar Werner, Frank Pursche. Modern high-strength low-alloyed steels. *Proceedings of the 1st International Conference on Recent Trends in Structural Materials, COMAT 2010*. 2010, pp. 13-18.
  6. Salganik V.M., Poletskov P.P., Gushchina M.S., Berezhnaia G.A., Kuznetsova A.S., Stekanov P.A., Alekseev D.Y. Manufacturing patterns of high-strength nanostructured sheet steel. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. P.O. Suhogo* [Vestnik of Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoy]. 2015, no. 1, pp. 27-30.
  7. Salganik V.M., Poletskov P.P., Artamonova M.O., Denisov S.V., Chikishev D.N. "Termodeform" research and production complex for creation of new technologies. *Stal'* [Steel]. 2014, no. 4, pp. 104-107.
  8. Salganik V.M., Denisov S.V., Poletskov P.P., Stekanov P.A., Berezhnaya G.A., Alekseev D.Y. Physical simulation of production process of hot-rolled sheet of unique properties. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tehničeskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 3, pp. 37-39.
  9. Chukin M.V., Kolokoltsev V.M., Gun G.S., Salganik V.M., Platov S.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University research activities under conditions of the nanotechnology development. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tehničeskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2009, no. 2, pp. 55-59.
  10. Salganik V.M., Poletskov P.P., Berezhnaya G.A., Gushchina M.S., Alekseev D.Y. *Issledovanie vlijaniya temperatury nagreva pri zakalke na mehanicheskie svojstva nizkolegirovannoj vysokoprochnoj stali* [Effect of quenching temperature on mechanical properties of high-strength low-alloy sheet steel]. *Proizvodstvo prokata* [Rolled Products Manufacturing]. 2015, no. 5, pp. 32-37.

Исследование влияния режимов термической обработки на механические свойства высокопрочного листового проката / Полецков П.П., Гущина М.С., Бережная Г.А., Алексеев Д.Ю., Набатчиков Д.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 88-92.

Poletskov P.P., Gushchina M.S., Berezhnaya G.A., Alekseev D.Yu., Nabatchikov D.G. Effect of heat treatment conditions on mechanical properties of high-strength rolled steel sheet. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tehničeskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 88-92.



# СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 658.562.012.7

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА УРОВНЯ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ В УСЛОВИЯХ ПРИНЯТОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Валяева Г.Г., Пузанкова Е.А., Иванова Т.А., Реент Н.А., Трофимова В.Ш.

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

**Аннотация.** В работе рассмотрена методика моделирования и оценки уровня качества металлопродукции в условиях стабильного технологического процесса производства с помощью надежных методов количественной оценки. Отмечено, что к таким методам относятся методы многомерного статистического анализа качества, которые дают возможность частичного или полного отказа от прямых испытаний (разрушающими методами) и перехода на статистический контроль качества.

Для формирования исходного массива использованы результаты приемосдаточных испытаний крепежных изделий восьми типоразмеров, собранные лабораторией завода за два года.

Уделено особое внимание формированию статистических массивов данных и повышению их информационной ценности. Приведены примеры построения аттестационных моделей для различных типоразмеров крепежных изделий. Выполнен анализ ранее аттестованных моделей по классам прочности в условиях существующих производственных технологий и установлено, что при использовании аттестационных моделей достаточно точно определяется уровень качества, характеризуемый классом прочности.

**Ключевые слова:** технико-экономический анализ, математическая модель, контроль качества продукции, производственная технология, многомерный статистический анализ, металлопродукция.

### Введение

Для современного производства требуются надежные прогрессивные методы количественной оценки уровня качества продукции. В металлургии к таким методам относятся неразрушающие и статистические методы, так как контроль механических свойств металлопродукции разрушающими методами связан с большими материальными, временными, энергетическими и другими затратами. При рациональном сочетании разрушающих, неразрушающих и статистических испытаний можно обеспечить высокую надежность контроля и стабильность качества металлопродукции при значительной экономии материальных, энергетических, трудовых и других видов ресурсов.

Специфика и сложность технологических процессов производства обуславливает вероятностный характер ожидаемых результатов, что

накладывает определенные требования на методы обработки информации с учетом табличного формата представления информационных массивов и интересующего комплексного рассмотрения столбцового и строчного пространства этих данных [6–8].

Существуют два подхода в интерпретации и статистической обработке исходных данных, задаваемых в виде матрицы  $X$  многомерных наблюдений, имеющей  $n$  строк (случаев) и  $m$  столбцов (признаков).

Первый подход основан на статистическом характере данных, что наталкивает исследователя на ту или иную вероятностную модель в предположении, что имеем дело с  $m$ -мерной выборкой объема  $n$  из генеральной совокупности, и тогда к услугам исследователя – классические методы математической статистики, например регрессионный, или дисперсионный, анализ. Второй подход основан на алгебрологическом анализе матрицы данных  $X$  в предположении, что  $n$  объектов с  $m$  признаками могут быть раз-

биты на  $k$  совокупностей (подвыборок) наблюдений или  $k$  однородных классов, и тогда очевидную задачу классификации можно решить подходящими для этой цели методами кластерного или дискриминантного анализа. Для обоих подходов общим после выбора конкретного оптимизирующего критерия являются математические средства решения – методы решения экстремальных задач. Различие подходов состоит в обосновании выбора функционала качества метода, его интерпретации и получаемых выводах.

#### **Формирование информационных массивов для моделирования качества продукции черной металлургии**

Для моделирования качества крепежных изделий используем результаты приемосдаточных испытаний и построим массив размерностью  $(3360 \times 20)$ . Согласно ГОСТ испытания проводились на 10 изделиях, случайно отобранных от каждой партии. Из-за внутриплавочной неоднородности металлопродукция, выдержавшая стандартный контроль, может фактически оказаться бракованной. Поэтому необходимо оценить надежность контроля качества партий по контролируемым признакам, для чего воспользуемся методикой, представленной в статье [9].

Найденные на основе результатов стандартных испытаний законы распределения контролирующих признаков позволяют оценить вероятность выдержать стандартные испытания на ограниченном количестве образцов, но оценить надежность партий, выдержавших стандартный контроль, так же просто не удастся.

Исследования показали, что только по 65–78% партий, выдержавших стандартные испытания на ограниченном количестве образцов, можно гарантировать надежность 0,95 по контролируемому признаку. Остальная часть партий (22–35%) бракуется или по ним дополнительно проводятся испытания на большем количестве образцов, что является дополнительными затратами. Невысокая надежность стандартных испытаний и возможное увеличение затрат на дополнительные испытания приводят нас к необходимости перехода на статистический контроль качества, а именно к построению аттестационных моделей.

Ранее отмечалось наличие внутриплавочной неоднородности, кроме того, имеющаяся неоднородность числового материала: у многих партий изделий и сырья химический анализ проводился не в полном объеме, полный химический анализ был определен у 226 партий, у семнадцати партий изделий были зафиксированы шесть элементов химического состава и т.д. По этим причинам построить регрессионные модели для кон-

троля качества крепежных изделий обычном способом не представляется возможным. Только неформальный предварительный анализ разнотипных данных, проводимый с использованием методов математической статистики, может дать положительный результат.

При формировании информационного массива необходимо учитывать разнородность числового материала и выполнить ряд процедур, повышающих информационную ценность массивов статистических данных:

- проверить результаты химического анализа на несмещенность, в случае положительного ответа распространить после усреднения результаты на всю партию;
- исключить из статистической обработки резко выделяющиеся из общей закономерности аномальные данные (например, с помощью кластерного анализа);
- проверить результативные признаки на нормальность и решить вопрос о целесообразности преобразования данных;
- решить вопрос о возможности объединения в единый массив данных, собранных в разные временные периоды;
- оценить дисперсии контролируемых признаков в каждой партии, т.е. оценить так называемую внутриплавочную неоднородность с целью проверки однородности дисперсий и возможности объединения партий в массивы по типоразмерам и т.д.

Для осуществления перечисленных процедур были найдены некоторые выборочные числовые характеристики входных ( $x_1-x_{16}$ ) и выходных ( $y_1-y_3$ ) признаков.

Средние значения и оценки средних квадратических отклонений процентного содержания химических элементов в составе сырья и готовой продукции не совпадали ни в одном из восьми исследуемых массивов, что привело к необходимости исследования средних значений на несмещенность по  $t$ -критерию и дисперсий на однородность по  $F$ -критерию.

Результаты анализа статистических данных позволили сформировать массивы, пригодные для регрессионного анализа, по каждому из восьми типоразмеров изделий.

Учитывая, что для производства важно не только иметь в распоряжении надежные аттестационные модели, но и выявить для регулирования качеством продукции наиболее влиятельные факторы: механические свойства сырья, химический состав, геометрические размеры, технологические схемы. В статье [2] предложено строить регрессионные модели на основе разных

наборов факторных признаков, интересующих производителей:

I набор факторов –  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ ; (сырьё);

II набор факторов –  $x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}$  (химический состав);

III набор факторов – совокупность всех контролируемых факторов (объединение I и II наборов признаков, с учетом геометрических размеров и технологической схемы).

Регрессионные модели (линейные и квадратичные), полученные на базе I набора при раздельной обработке массивов по типоразмерам, оказались вполне пригодными для аттестации крепежных изделий. Второй набор факторов обеспечил не меньший коэффициент множественной детерминации, чем первый. Это только подтверждает, что в условиях стабильной технологии механические свойства метизов и подката для них сами определяются, в основном, химическим составом металла.

На заключительном этапе построения регрессионных моделей использовался единый массив данных, объединяющий выборки по всем типоразмерам крепежных изделий. Такое объединение существенно расширило возможности моделирования качественных характеристик изделий, так как в этих условиях значительно увеличился вариационный размах признаков. Объединение всех данных в один массив при построении регрессионных моделей наиболее благоприятно сказалось на характеристике  $y_1$ , менее на  $y_2$  и незначительно на  $y_3$ .

Приведенные ниже уравнения составлены на основе массива, объединившего все статистические данные.

В полученных уравнениях задействованы следующие факторы:

- механические характеристики для заготовки:  $x_1$  – временное сопротивление разрыву,  $x_2$  – относительное удлинение после разрыва,  $x_3$  – относительное сужение,  $x_4$  – твердость по Бринеллю,  $x_5$  – твердость по Роквеллу;
- геометрические (размер изделия):  $x_6$  – диаметр заготовки (подката),  $x_{14}$  – длина изделия,  $x_{15}$  – диаметр изделия;
- химический состав металла изделий и сырья (наличие примесей в металле, %):  $x_7$  – углерод,  $x_8$  – марганец;  $x_9$  – сера,  $x_{10}$  – фосфор,  $x_{11}$  – хром,  $x_{12}$  – никель,  $x_{13}$  – медь;
- технологический  $x_{16}$  – схема редуцирования (обжатие в один или два прохода) [4].

Приведенные ниже уравнения составлены на основе массива, объединившего все статистические данные.

Для временного сопротивления разрыву, Н/мм<sup>2</sup>:

$$y_1 = B_0 + 7,526x_{16} + 0,18497x_{12} + 0,15229x_5 + 18,3908x_8 + 25,2657x_{11} - 0,05262x_3 + 0,0252x_4 + 38,75x_9 + 16,7493x_{13} - 20,0755x_{12} - 0,07557x_2 + 6,6265x_7 - 0,00977x_{14};$$

$$R=0,770.$$

Характеристики уравнения представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Значения  $B_0, \Delta, C_{н.4}, C_{н.5}, C_{н.6}$  для  $y_1$  по типоразмерам

Типоразмер изделия	Свободный член уравнения $B_0$	Ошибка уравнения $\Delta$	Приемочные числа для классов прочности: 4.8, 5.8, 6.8		
			$C_{н.4}$	$C_{н.5}$	$C_{н.6}$
M6	34,77	4,435	49,273	59,273	67,273
M8	32,15	4,316	19,078	59,078	67,078
M10	30,85	3,393	47,564	57,564	65,564
M12	38,38	3,564	47,845	57,845	65,645
M16	30,27	3,268	47,359	57,359	65,359
M20	32,14	3,537	47,801	57,801	65,801
M22	35,48	2,193	45,596	55,596	63,596
M24	33,30	2,134	45,500	55,500	63,500

Уравнение регрессии для определения твердости по Бринеллю:

$$y_2 = B_0 - 0,334x_{14} + 0,258x_4 + 40,079x_7 - 12,594x_{16} + 0,263x_1 + 53,040x_{12} - 4,242x_{15} + 3,328x_6 - 0,175x_3 + 154,338x_9;$$

$$R=0,669.$$

Основные характеристики уравнения представлены в табл. 2.

Таблица 2  
Значения  $B_0, \Delta, C_{н.4}, C_{н.5}, C_{н.6}$  для  $y_2$  по типоразмерам

Типоразмер изделия	Свободный член уравнения $B_0$	Ошибка уравнения $\Delta$	Приемочные числа для классов прочности: 4.8, 5.8, 6.8		
			$C_{н.4}$	$C_{н.5}$	$C_{н.6}$
M6	138,57	19,754	156,397	184,397	213,397
M8	136,95	14,405	147,625	175,625	204,625
M10	143,10	13,570	146,255	174,255	203,255
M12	153,00	11,910	143,532	171,532	200,532
M16	150,39	14,168	147,236	175,236	204,236
M20	141,04	13,788	146,612	174,612	203,612
M22	146,87	11,613	143,045	171,045	200,045
M24	132,49	12,074	143,802	171,802	200,802

Уравнение регрессии для определения твердости по Роквеллу:

$$y_3 = B_0 - 0,090x_{14} + 0,322x_5 - 4,260x_{16} - 1,186x_{15} + 99,031x_9 + 1,581x_6 - 0,073x_3 - 24,728x_{12} + 28,684x_{12} - 0,018x_4 - 13,776x_{11} + 22,064x_{10} - 0,040x_2 + 3,863x_7;$$

$$R=0,734.$$

Основные характеристики уравнения представлены в табл. 3.

**Таблица 3**  
Значения  $B_0$ ,  $\Delta$ ,  $C_{н.4}$ ,  $C_{н.5}$ ,  $C_{н.6}$  для  $y_3$  по типоразмерам

Типоразмер изделия	Свободный член уравнения $B_0$	Ошибка уравнения $\Delta$	Приемочные числа для классов прочности: 4.8, 5.8, 6.8		
			$C_{н.4}$	$C_{н.5}$	$C_{н.6}$
M6	78,272	2,832	75,646	86,646	93,646
M8	79,958	2,746	75,503	86,503	93,503
M10	80,348	3,0145	75,944	86,944	93,944
M12	81,415	3,2836	76,385	87,385	94,385
M16	82,880	4,1512	77,808	88,808	95,808
M20	79,357	4,3171	78,080	89,080	96,080
M22	80,328	4,5068	78,391	89,391	96,391
M24	78,458	3,7838	77,205	88,205	95,205

О качестве разработанных моделей многомерной регрессии можно судить по величине ошибки уравнения  $\Delta$ , приведенной в табл. 1–3 для всех характеристик и типоразмеров, зависит от качества и количества включенных в модель признаков, и при выполнении всех предпосылок регрессионного анализа  $i$ -е регрессионные остатки  $(y_i - \hat{y})$  распределены нормально со средним значением, близким к нулю, и дисперсией  $\Delta^2$ .

**Оценка уровня качества продукции в условиях принятой производственной технологии**

Кроме того, для оценки полученных моделей и существующей производственной технологии можно, пользуясь методами многомерной классификации, определить корректность отнесения к классам прочности одного из видов крепежных изделий. Используем второй подход, основанный на алгебрологическом анализе матрицы данных о крепежных изделиях в предположении

о том, что полученные в результате аттестации объектов с  $x_1 - x_{16}$  признаками могут быть разбиты на классы прочности. Классификация совокупностей объектов на однородные, в определенном смысле, схожие группы может быть выполнена разными методами, в частности методом линейной дискриминации [3].

Алгоритм дискриминантного анализа предполагает использование обучающей выборки при построении решающих правил для классификации новых объектов. В качестве обучающей выборки использовали фактические данные ранее аттестованной продукции, без применения статистических методов, и сведения о составе классов, полученные на основе многомерной классификации методом  $k$  - средних.

Для определения существенности различий между классами используем критерий Уилкса. Значения критерия Уилкса вычисляются по формуле

$$\Lambda_w = \prod_{i=1}^{(l-1)} \frac{1}{1 + \lambda_i}.$$

$\Lambda_w$  – является обратной мерой по отношению к собственным числам  $\lambda_i$  и очевидно, что  $0 < \Lambda_w < 1$ , поэтому значения  $\Lambda_w$ , статистически близкие к нулю, отвечают высокой степени различимости классов (степень разброса центроидов выше по отношению к степени разброса внутри класса). При  $\Lambda_w \rightarrow 1$  ухудшается различение, центроиды станут совпадать и обнаружить групповые различия не представится возможным. При  $\Lambda_w$ , статистики близком к единице, информацию о различии классов не следует включать, т.е. оставшиеся дискриминантные функции могут оказаться статистически незначимыми.

Используем ранее полученные результаты аттестационного анализа и определим критерий Уилкса (табл. 4).

**Таблица 4**  
Значения критерия Уилкса

Признаки	Значение критерия Уилкса	F-статистика
$x_1$	0,1265	8,71
$x_4$	0,4635	4463,02
$x_5$	0,1354	125,09
$x_{15}$	0,1316	75,25
$x_{16}$	0,128	27,98



Исходя из приведенных в **табл. 4** значений критерия Уилкса, можно утверждать, что в данном случае можно применить дискриминантный анализ, чтобы сравнить правильность группировки данных ранее аттестованных изделий лабораторными методами [8]. В качестве обучающей выборки воспользуемся результатами аттестации лабораторией.

Качество разбиения характеризует расстояние между кластерами (чем больше, тем качественнее разбиение), из их анализа (**табл. 5**) следует: разбиение на три кластера является вполне приемлемым, так как расстояния между кластерами вполне достаточны.

**Таблица 5**  
Расстояния между кластерами

	G_1:1	G_2:2	G_3:3
G_1:1		1613,4	1196
G_2:2	1613,4		3903
G_3:3	1196,1	3902,6	

Классификационная матрица в **табл. 6** показывает корректность или некорректность отнесения некоторых объектов к определенному классу. В класс 1 попали 4 изделия из класса 2, а в класс 2 – 40 изделий из класса 1, но в целом разбиение достаточно хорошее, т.к. корректность его достигает 98,2%, следовательно, предварительная классификация с помощью аттестационных моделей вполне пригодна.

**Таблица 6**  
Классификационная матрица

Классы	Процент корректности	G_1:1 p=,51574	G_2:2 p=,24498	G_3:3 p=,23928
G_1:1	99,77	1716	4	0
G_2:2	95,10	40	777	0
G_3:3	98,25	14	0	784
Итого	98,26	1770	781	784

Ниже приведены полученные дискриминантные функции, по которым произошло разбиение на классы:

$$G_1 = -282,522 + 0,5330y_1 + 1,695y_2 + 2,438y_3;$$

$$G_2 = -205,58 + 0,5335y_1 + 1,349y_2 + 2,202y_3;$$

$$G_1 = -350,999 + 0,5558y_1 + 2,0498y_2 + 2,391y_3.$$

Как уже говорилось раньше, в качестве предварительного разбиения использовались данные аттестации металлопродукции по моделям, представленным в **табл. 1–3**. В **табл. 7** приведены средние значения классификационных показателей, которые соответствуют трем классам прочности: 4.8, 5.8 и 6.8. Причем кластеру №1 соответствует класс прочности 5.8, кластеру №2 – класс 4.8 и кластеру №3 – класс прочности 6.8. При рассмотрении **табл. 7** следует обратить внимание на то, что существенным признаком отнесения к классу является технологический – чем больше среднее значение показателя  $x_{16}$  (схема редуцирования), тем выше класс прочности.

**Таблица 7**  
Средние значения признаков по кластерам

Признак	Кластер №1	Кластер №2	Кластер №3
$x_1$	61,80406	56,80685	65,9609
$x_4$	182,9866	149,7797	213,9662
$x_5$	90,51209	80,06646	93,57845
$x_{15}$	10,63726	16,83308	9,025275
$x_{16}$	1,34593	1,116279	1,498747

### Заключение

На основании проведенной дискриминации можно сделать следующий вывод: аттестационные модели достаточно корректно производят разбиение на классы прочности – 98,26% правильно отнесенных объектов. Кроме того, можно сделать вывод о структуре выпуска крепежных изделий, выпускаемых предприятием: более 53% изделий имеют класс прочности 5.8; приблизительно поровну – по 23% классы 6.8 и 4.8, причем основная доля изделий с классом прочности 6.8 приходится на изделия маленьких типоразмеров М6-М10. Связано это, в первую очередь, с исходным материалом – подкатом, его размер (диаметр) не является оптимальным для заготовки, поэтому применяют дополнительное обжатие. Цель этого обжатия – придание нужного размера заготовке. Следовательно, если имеется необходимость в увеличении доли изделий больших типоразмеров с повышенным классом прочности, то можно рекомендовать применять для них двойное обжатие. Однако если предприятие хорошо реализует продукцию меньшего класса прочности, то следует

подыскивать материал, обладающий оптимальными размерами, позволяющий не проводить дополнительное обжигание и там самым экономить ресурсы.

Список литературы

1. Мельникова Г.Г. Многомерный статистический анализ качества продукции на металлургических предприятиях: дис. ... канд. экон. наук. Магнитогорск, 2003.
2. Бушманова М.В., Мельникова Г.Г. Некоторые приемы повышения работоспособности регрессионных моделей для аттестации металлопродукции // Математико-статистический анализ социально-экономических явлений: сб. науч. трудов. М.: МЭСИ, 2003.
3. Мельникова Г.Г. Обоснование допустимости и целесообразности перехода на статистический контроль качества металлопродукции // Математика. Приложение математики в экономических, технических и педагогических исследованиях: сб. науч. трудов. Ч. 2. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2003.
4. Опыт применения подката из непрерывных заготовок при изготовлении крепежных изделий / Трефилов В.А., Соколов А.А., Гусева Е.М., Федоров А.Н., Гасилин А.В., Мельникова Г.Г. // Эффективные технологии производства метизов: сб. науч. трудов. Магнитогорск, 2001. С. 12–16.
5. Бушманова М.В., Девятченко Л.Д., Мельникова Г.Г. Оценка пригодности процесса изготовления крепежа по контрольным выборкам характеристик качества // Математика. Приложение математики в экономических, технических и педагогических исследованиях: сб. науч. трудов. Магнитогорск: МГТУ, 2005.
6. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики: учебник для вузов. М.: ЮНИТИ, 2001.
7. Бушманова М.В., Мельникова Г.Г. Применение методов математической статистики для повышения надежности контроля свойств проката // VII международная конференция «Применение многомерного статистического анализа в экономике и оценке качества»: тез. доклада. Москва, 2001.
8. Мхитарян В.С., Сиротин В.П. Применение многомерных статистических методов в экономике и оценке качества // Вопросы статистики. 2011. № 1. С. 65–66.
9. Реализация дискриминантного анализа применительно к социально-экономическим объектам / Девятченко Л.Д., Мельникова Г.Г., Милых Т.М., Шарабуряк Ю.А. // Математика. Приложение математики в экономических, технических и педагогических исследованиях: сб. науч. трудов. Вып. 2. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2003.
10. Статистический анализ и оценка надежности стандартного контроля качества продукции / Мельникова Г.Г., Девятченко Л.Д., Мхитарян В.С., Бушманова М.В. // Математика. Приложение математики в экономических, технических и педагогических исследованиях: межвуз. сб. науч. трудов. Магнитогорск: МГТУ, 2004. С. 63–68.
11. Девятченко Л.Д. Многомерный анализ соответствий организационных признаков и результативности труда в прокатном производстве // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. №4. С. 61–69.
12. Никифоров Б.А., Машурев А.Л., Колокольцев В.М. Интеграция образования, науки и производства // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. №2. С. 8–12.
13. Оценка ресурсов процесса термообработки рулонов холоднокатаного металла / Девятченко Л.Д., Маяченко Е.П., Корнилов В.Л., Буданова А.П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. №4. С. 44–48.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

SIMULATION AND ASSESSMENT OF METAL PRODUCTS QUALITY UNDER CONDITIONS OF THE ACCEPTED PRODUCTION TECHNOLOGY

**Valiaeva Galina Gennadievna** – Ph.D. in Economics, Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: valyaevag@list.ru.

**Puzankova Evguenia Aleksandrovna** – Ph.D. in Mathematics and Physics, Head of the Department of Calculus No. 2 of the Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: janny70@mail.ru.

**Ivanova Tatiana Aleksandrovna** – Ph.D. in Economics, Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Reent Natalia Anatolievna** – Ph.D. in Economics, Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Trofimova Violetta Shamilievna** – Ph.D. in Economics, Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Abstract.** The article considers simulation and assessment of metal products quality with reliable quantification methods in the context of a stable production process. The authors note that such methods include a multivariate statistical quality analysis which ensures a partial or complete refusal of direct testing (destructive methods) and change-over to a statistical quality control.

Being collected by the plant laboratory in a two-year span, the results of acceptance tests of fasteners of eight

standard sizes have been used to form the original array.

The authors pay a special attention to the formation of statistical data arrays and the improvement of their information value. The article gives examples of the certification model development for various standard sizes of fasteners. The authors have analyzed previously certified models in terms of strength grades under conditions of existing production technologies. It has been found out that a strength-grade quality level can be determined

quite accurately when using certification models.

**Keywords:** Technical and economic analysis, mathematical model, product quality control, production technology, multivariate statistical analysis, metal products.

References

1. Melnikova G.G. *Multivariate statistical product-quality analysis at metallurgical enterprises*. Ph.D. dissertation. Magnitogorsk, 2003.
2. Bushmanova M.V., Melnikova G.G. Some methods of improving the regression models efficiency for metal products certification. *Matematiko-statisticheskij analiz sotsial'no-ehkonomicheskikh yavlenij: sbornik nauchnykh trudov* [Mathematical and statistical analysis of social and economic phenomena. Collection of scientific works]. M.: MESI, 2003.
3. Melnikova G.G. Justification of acceptability and feasibility of a change-over to a statistical control of metal products quality. *Matematika. Prilozhenie matematiki v ehkonomicheskikh, tekhnicheskikh i pedagogicheskikh issledovaniyakh: sbornik nauchnykh trudov. Chast' 2* [Mathematics. Application of mathematics to economic, technical and pedagogical research. Collection of scientific works. Part 2]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2003.
4. Trefilov V.A., Sokolov A.A., Gusev E.M., Fedorov A.N., Gasilin A.V., Melnikova G.G. Experience in applying semi-finished continuous rolled billets when manufacturing fastening products. *Ehffektivnye tekhnologii proizvodstva melizov: sbornik nauchnykh trudov* [Collection of scientific works "Efficient hardware production technologies."]. Magnitogorsk, 2001, pp. 12-16.
5. Bushmanova M.V., Devyatchenko L.D., Melnikova G.G. Quality-test-sampling applicability estimation of the fasteners manufacturing process. *Matematika. Prilozhenie matematiki v ehkonomicheskikh, tekhnicheskikh i pedagogicheskikh issledovaniyakh: sbornik nauchnykh trudov* [Mathematics. Application of mathematics to economic, technical and pedagogical research. Collection of scientific works. Part 3]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2005.
6. Ayvazyan S.A., Mkhitarian V.S. *Prikladnaya statistika i osnovy ehkonometriki: uchebnik dlya vuzov* [Applied statistics and econometrics basics. Textbook for higher education institutions]. Moscow: UNITY, 2001.
7. Bushmanova M.V., Melnikova G.G. Application of mathematical statistics methods to improve reliability of rolled product feature control. *VII mezhdunarodnaya konferentsiya «Primenenie mnogomernogo statisticheskogo analiza v ehkonomike i otsenke kachestva»: tez. doklada* [VII international Conference on Application of the multivariate statistical analysis in economics and quality assessment]. Moscow, 2001.
8. Mkhitarian B.C., Sirotin V.P. Multidimensional statistical methods in economics and quality assessment. *Voprosy statistiki* [Statistical Issues]. 2011, no. 1, pp. 65-66.
9. Devyatchenko L.D., Melnikova G.G., Mealykh T.M., Sharaburyak Y.A. Implementation of a discriminant analysis in the context of social and economic objects. *Matematika. Prilozhenie matematiki v ehkonomicheskikh, tekhnicheskikh i pedagogicheskikh issledovaniyakh: sbornik nauchnykh trudov. Vypusk 2* [Mathematics. Application of mathematics to economic, technical and pedagogical research. Collection of scientific works. Part 2]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2003.
10. Melnikova G.G., Devyatchenko L.D., Mkhitarian V.S. Bushmanova M.V. Statistical analysis and evaluation of reliability of a standard quality control. *Matematika. Prilozhenie matematiki v ehkonomicheskikh, tekhnicheskikh i pedagogicheskikh issledovaniyakh: mezhvuz. sbornik nauchnykh trudov* [Mathematics. Application of mathematics to economic, technical and educational research: Interuniversity collection of scientific papers]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2004, pp. 63-68.
11. Devyatchenko L.D. Multivariate analysis of relevant organizational characteristics and rolling production gains in performance. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2007, no. 4, pp. 61-69.
12. Nikiforov B.A., Mastruev A.L., Kolokoltsev V.M. Integration of education, science and industry. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2007, no. 2, pp. 8-12.
13. Devyatchenko L.D., Marchenko E.P., Kornilov V.L., Budanov A.P. Assessment of heat treatment resources of cold-rolled metal coils *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010, no. 4, pp. 44-48.

Моделирование и оценка уровня качества металлопродукции в условиях принятой производственной технологии / Валяева Г.Г., Пузанкова Е.А., Иванова Т.А., Реент Н.А., Трофимова В.Ш. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 93–99.

Valiaeva G.G., Puzankova E.A., Ivanova T.A., Reent N.A., Trofimova V.Sh. Simulation and assessment of metal products quality under conditions of the accepted production technology. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 93–99.

# НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 519.8 : 621.73

## ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ РЫЧАЖНОЙ РАДИАЛЬНО-КОВОЧНОЙ МАШИНЫ

Паршин В.С., Карамышев А.П., Чигринский А.Е., Чумакова Л.А., Некрасов И.И.

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

**Аннотация.** В статье рассмотрены проблемы расчета и выбора приведенной модели для изучения динамического нагружения привода рычажной радиально-ковочной машины. Разработана и проанализирована расчетная схема, получена система дифференциальных уравнений для исследования динамических процессов в приводной линии рычажной радиально-ковочной машины. Изложен порядок расчета динамического нагружения, представлены формулы для расчета и приведения моментов инерции, жесткости и моментов, входящих в расчет упругих звеньев, произведено обоснование выбора расчетной динамической модели. Представлена система дифференциальных уравнений для расчета динамического нагружения привода рычажной радиально-ковочной машины.

**Ключевые слова:** ковка, рычажная радиально-ковочная машина, расчетная динамическая модель, момент инерции, жесткость звеньев, приведение звеньев привода, динамические нагружения, система дифференциальных уравнений движения масс.

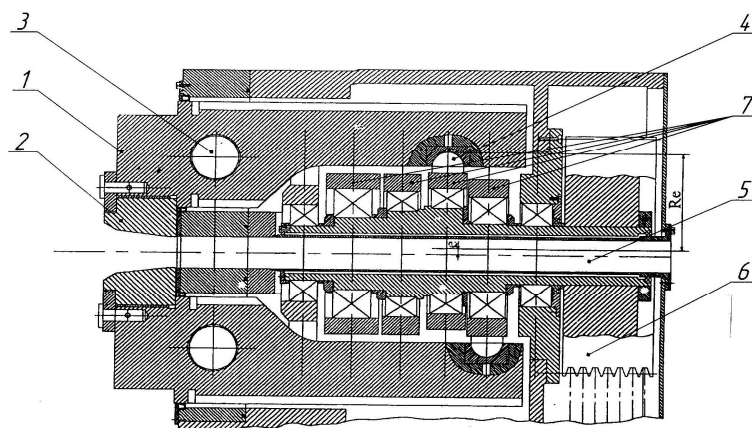
### Введение

Проектирование приводных линий различного металлургического оборудования производят по максимальному требуемому усилию на рабочем инструменте, нагрузке на исполнительном органе и т.д. Однако при динамическом действии нагрузок напряжения обычно будут больше, чем при статическом действии тех же нагрузок. Исходя из этого, необходимо производить оценку влияния динамической составляющей действующей на механизм нагрузки, что позволит определить эксплуатационные характеристики еще на стадии проектирования [1, 2].

Сложность исследования динамического нагружения звеньев рычажных радиально-ковочных машин обусловлена конструктивным исполнением и компоновкой привода. В высоконагруженных шарнирно-рычажных механизмах, как правило, стремятся устранить статическую неуравновешенность, что позволяет исключить либо снизить негативное воздействие сил инерции звеньев [3].

На **рис. 1** представлен разрез по продольной

оси главного вала привода рычажной радиально-ковочной машины.



**Рис. 1.** Разрез по продольной оси главного вала:

- 1 – рычаг; 2 – боек; 3 – ось качания рычага;
- 4 – сферический подпятник; 5 – главный вал с эксцентриками;
- 6 – ведомый шкив ременной передачи;
- 7 – подшипники с втулками подъема рычагов

**Цель работы.** Определение уровня динамических нагрузок на элементы привода кривошипного механизма со сложным движением звеньев на примере рычажной радиально-ковочной машины с целью определения рациональных параметров этих элементов.

© Паршин В.С., Карамышев А.П., Чигринский А.Е., Чумакова Л.А., Некрасов И.И., 2015

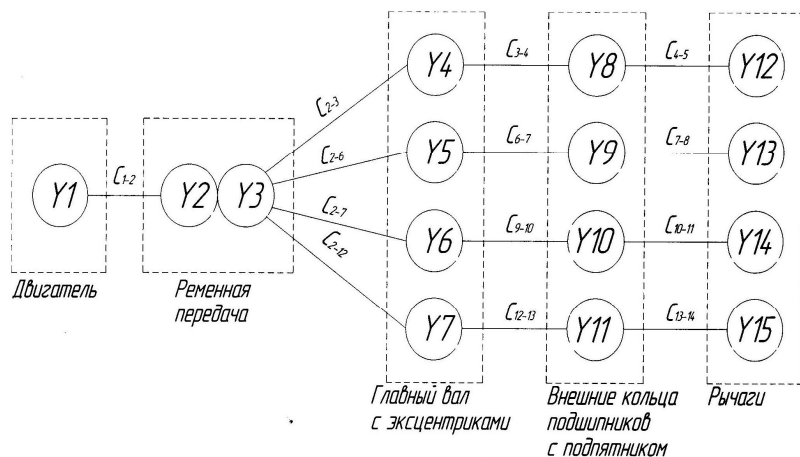


**Методика проведения исследования**

Из технической литературы, посвященной изучению динамики приводов машин и механизмов, известно: построение расчетной схемы базируется на предположении, что механическая часть привода может быть заменена физической моделью, состоящей из дискретных масс, которые соединены между собой упругими звеньями [4–6]. При составлении физической модели реальных механизмов и машин основным является обоснованный выбор минимального числа дискретных (сосредоточенных) масс, имея в виду, что сложность математического решения задач по расчету возрастает с увеличением их числа. Изучение влияния динамического нагружения звеньев необходимо, например, для оценки долговечности работы по критерию износа, но вначале нужно выявить, какое влияние оказывают динамические усилия в математической модели [7, 8].

Приняв во внимание особенности кинематической схемы рычажной радиально-ковочной машины, наиболее полным будет предположение представить приведенную расчетную модель привода в виде системы, разделяющейся на четыре ветки соответственно четырем рычагам машины, через которые вращательное движение двигателя преобразуется в возвратно – качательное движение бойков.

Для аналитического исследования динамических процессов в приводе рычажной радиально-ковочной машины предлагается ее приведенная модель, представленная на **рис. 2**.



**Рис. 2. Приведенная модель привода рычажной радиально-ковочной машины:  $Y_{1...15}$  – момент инерции элемента привода,  $кН \cdot м \cdot с^2$ ;  $C_{1-2...13-14}$  – коэффициент жесткости элемента привода,  $кН \cdot м / рад$**

Определение приведенных инерционных масс, параметров жесткости и приведенных нагрузок для расчетных схем производится по одному алгоритму путем приведения всех звеньев привода к

быстроходному валу двигателя [9–11].

$$(Y_j)^k = (Y_j)^i \cdot \left( \frac{\omega_i}{\omega_k} \right)^2 = (Y_j)^i \cdot u^2,$$

где  $\omega_i$  – угловая скорость  $i$ -го вала;  $\omega_k$  – угловая скорость  $k$ -го вала;  $(Y_j)^i$  – момент инерции  $j$ -й массы на  $i$ -м валу;  $(Y_j)^k$  – приведенный к  $k$ -му валу момент инерции  $j$ -й массы на  $i$ -м валу;  $u$  – передаточное число.

$$(C_j)^k = (C_j)^i \cdot \left( \frac{\omega_i}{\omega_k} \right)^2 = (C_j)^i \cdot u^2,$$

где  $(C_j)^i$  – коэффициент жесткости  $j$ -го участка  $i$ -го вала;  $(C_j)^k$  – приведенный к  $k$ -му валу коэффициент жесткости  $j$ -го участка  $i$ -го вала.

$$(M_j)^k = (M_j)^i \cdot \left( \frac{\omega_i}{\omega_k} \right)^2 = (M_j)^i \cdot u^2,$$

где  $(M_j)^i$  – внешний момент, приложенный к  $j$ -й массе на  $i$ -м участке;  $(M_j)^k$  – приведенный к  $k$ -му валу внешний момент, действующий на  $j$ -ю массу на  $i$ -м участке.

После приведения всех звеньев привода к валу двигателя получим систему дифференциальных уравнений движения масс, описывающую динамические процессы в приводной линии машины без учета затухания колебаний.

Расчет системы дифференциальных уравнений произведем с помощью пакета MathCAD [12], при этом получим систему, состоящую из 13 дифференциальных уравнений. Фактически, расчетная приведенная модель представляет собой четыре взаимосвязанные ветки системы, расчет которых нужно производить совместно с целью учета взаимного влияния звеньев системы друг на друга и на саму систему в целом. На основании этого принято решение учесть взаимное влияние звеньев на этапе приведения и составить систему дифференциальных уравнений таким образом, чтобы расчетная программа просчитывала их последовательно, при этом сократится число

входящих в систему дифференциальных уравнений и расчет будет произведен корректно.

Этап приведения выглядит следующим образом:

$$Y_1 = Y1;$$

$$Y_2 = Y2 \cdot \left(\frac{\omega_1}{\omega_1}\right)^2 + Y3 \cdot \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 = Y2 + Y3 \cdot u_1^2;$$

$$Y_3 = Y4 \cdot \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 + Y5 \cdot \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 + Y6 \cdot \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 + Y7 \cdot \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 = (Y4 + Y5 + Y6 + Y7) \cdot u_1^2;$$

$$Y_4 = Y8 \cdot \left(\frac{\omega_3}{\omega_1}\right)^2 + Y9 \cdot \left(\frac{\omega_3}{\omega_1}\right)^2 + Y10 \cdot \left(\frac{\omega_3}{\omega_1}\right)^2 + Y11 \cdot \left(\frac{\omega_3}{\omega_1}\right)^2 = (Y8 + Y9 + Y10 + Y11) \cdot u_2^2;$$

$$Y_5 = \left[ m \cdot \left(\frac{V_1}{\omega_1}\right)^2 + Y12 \cdot \left(\frac{V_1}{Rp1 \cdot \omega_1}\right)^2 \right] + \left[ m \cdot \left(\frac{V_2}{\omega_1}\right)^2 + Y13 \cdot \left(\frac{V_2}{Rp2 \cdot \omega_1}\right)^2 \right] + \left[ m \cdot \left(\frac{V_3}{\omega_1}\right)^2 + Y14 \cdot \left(\frac{V_3}{Rp3 \cdot \omega_1}\right)^2 \right] + \left[ m \cdot \left(\frac{V_4}{\omega_1}\right)^2 + Y15 \cdot \left(\frac{V_4}{Rp4 \cdot \omega_1}\right)^2 \right],$$

где  $V_1, V_2, V_3, V_4$  – линейные скорости подъема подпятников, м/с;  $R$  – расстояние от оси вращения рычага до точки приложения усилия ковки, м;  $m$  – масса рычага, кг;  $Rp1, Rp2, Rp3, Rp4$  – расстояние от оси вращения рычага до поверхности контакта с подпятником, м (рис. 3).

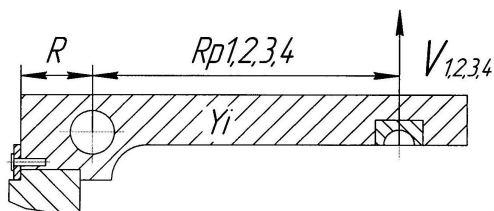


Рис. 3. Расчетная схема рычага:

$V_1, V_2, V_3, V_4$  – линейные скорости подъема подпятников, м/с;  $R$  – расстояние от оси вращения рычага до точки приложения усилия ковки, м;  $Rp1, Rp2, Rp3, Rp4$  – расстояние от оси вращения рычага до поверхности контакта с подпятником, м

Линейные скорости подъема подпятников определяются по следующей формуле [13]:

$$V = \omega \cdot e \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \left[ 1 + \frac{\cos(\omega \cdot t)}{\sqrt{\left(\frac{Re}{e}\right)^2 - \sin^2(\omega \cdot t)}} \right],$$

где  $\omega$  – частота вращения главного вала,  $c^{-1}$ ;  $Re$  – расстояние от оси вращения главного вала до поверхности контакта соответствующего сферического подпятника и рычага, м;  $e$  – соответствующий эксцентриситет главного вала, м (см. рис. 1).

### Результаты и обсуждение исследования

Система дифференциальных уравнений движения масс, описывающая динамические процессы в приводной линии системы без учета затухания колебаний, согласно расчетной схеме будет иметь вид

$$Y_1 \cdot \frac{d^2}{d\tau^2} \Phi_1 = M_1 - C_{12} \cdot (\Phi_1 - \Phi_2);$$

$$Y_2 \cdot \frac{d^2}{d\tau^2} \Phi_2 = C_{12} \cdot (\Phi_1 - \Phi_2) - C_{23} \cdot (\Phi_2 - \Phi_3);$$

$$Y_3 \cdot \frac{d^2}{d\tau^2} \Phi_3 = C_{23} \cdot (\Phi_2 - \Phi_3) - C_{34} \cdot (\Phi_3 - \Phi_4);$$

$$Y_4 \cdot \frac{d^2}{d\tau^2} \Phi_4 = C_{34} \cdot (\Phi_3 - \Phi_4) - C_{45} \cdot (\Phi_4 - \Phi_5);$$

$$Y_5 \cdot \frac{d^2}{d\tau^2} \Phi_5 = C_{45} \cdot (\Phi_4 - \Phi_5) - M_3,$$

где  $Y_1, Y_2, Y_3 \dots, Y_5$  – приведенные моменты инерции масс привода,  $кН \cdot м \cdot с^2$ ;  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3 \dots, \Phi_5$  – углы поворота этих масс при колебании, рад;  $C_{12}, C_{23}, C_{43}, C_{34} \dots, C_{45}$  – приведенные жесткости участков,  $кН \cdot м / рад$ ;  $M_1, M_3$  – внешние моменты, примененные к соответствующим массам системы,  $кН \cdot м$ ;  $\tau$  – время, с.

Полученные дифференциальные уравнения можно записать в более удобном для расчета виде – в форме моментов сил упругости по методу С.Н. Кожевникова [4].

Вычитая последующее уравнение из предыдущего, согласно предложенной расчетной схеме получим:

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{d\tau^2} M_{12} &= \frac{M_1}{Y_1} \cdot C_{12} - C_{12} \times \\ &\times \frac{Y_1 + Y_2}{Y_1 \cdot Y_2} \cdot M_{12} + \frac{C_{12}}{Y_2} \cdot M_{23}; \\ \frac{d^2}{d\tau^2} M_{23} &= \frac{C_{23}}{Y_2} M_{12} - C_{23} \times \\ &\times \frac{Y_2 + Y_3}{Y_3 \cdot Y_2} \cdot M_{23} + \frac{C_{23}}{Y_3} \cdot M_{34}; \\ \frac{d^2}{d\tau^2} M_{34} &= \frac{C_{34}}{Y_2} M_{12} - C_{34} \times \\ &\times \frac{Y_3 + Y_4}{Y_3 \cdot Y_4} \cdot M_{34} + \frac{C_{34}}{Y_4} \cdot M_{45}; \\ \frac{d^2}{d\tau^2} M_{45} &= \frac{M_3}{Y_5} \cdot C_{45} + \\ &+ \frac{C_{45}}{Y_4} M_{34} - C_{45} \cdot \frac{Y_4 + Y_5}{Y_4 \cdot Y_5} \cdot M_{45}, \end{aligned}$$

где  $M_{ij} = C_{ij} \cdot (\Phi_i - \Phi_j)$  – моменты сил упругости на участке линии передачи между  $i$ -й и  $j$ -й массами.

Как видим, при рассмотрении взаимного влияния всех входящих в расчет величин на стадии приведения значительно упрощается расчет, приводящий к существенному уменьшению количества дифференциальных уравнений в системе, при этом учитывается влияние всех масс приводной линии машины на конечный результат.

**Выводы.** Выполненная на основе приведенных зависимостей математическая модель динамического нагружения звеньев рычажной радиально-ковочной машины позволяет оценить характер динамического нагружения, что повысит работоспособность привода путем выбора рациональных параметров звеньев, которые обеспечат наименьший уровень динамических усилий без потери жесткости приводной линии машины.

Полученная математическая модель является составной частью разработанной на кафедре «Металлургические и роторные машины» ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» методики, позволяющей проводить технологические расчеты и связанные с ними расчеты динамического нагружения для оценки работоспособности и выбора рациональных параметров звеньев.

В частности, проведенные расчеты в выполненной математической модели были использованы для разработки конструкции радиально-

ковочной машины для подготовки концов теплообменных труб из коррозионноустойчивых сталей аустенитного класса к волочению РКМ–45 [14].

#### Список литературы

1. Ибрагимов Ф.Г., Коковихин А.В., Кандауров Л.Е. Определение остаточной деформации облицовочной планки прокатной клети с учетом динамических напряжений при ударе // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. №1. С. 48–50.
2. Разработка математической модели контактно-гидродинамического расчета подшипников качения с целью повышения их эксплуатационных характеристик на стадии проектирования / Жиркин Ю.В., Мироненков Е.И., Султанов Н.Л., Тютряков Н.Ш., Юсупов Р.Р., Александров А.А. // Механическое оборудование металлургических заводов. 2013. №2. С. 115–120.
3. Родионов Н.А., Сотников А.Л., Журба В.В. Исследование влияния инерционных нагрузок на нагружения шарнирно-рычажного механизма качения сортовой МНЛЗ // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №4. С. 70–73.
4. Иванченко Ф.К., Красношапка В.А. Динамика металлургических машин. М.: Металлургия, 1983. 295 с.
5. Динамика и прочность прокатного оборудования / Иванченко Ф.К., Полухин П.И., Тылкин М.А., Полухин В.П. М.: Металлургия, 1970. 486 с.
6. Лехов О.С. Оптимизация машин для деформации непрерывнолитых заготовок. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1995. 181 с.
7. Методология вероятностной оценки надежности элементов машин по различным критериям / Анцупов А.В., Анцупов А.В., Анцупов В.П., Слободянский М.Г., Овсов А.М. // Механическое оборудование металлургических заводов. 2012. №1. С. 28–34.
8. Сергеев С.В., Решетников Б.А., Сергеев Ю.С. Исследование динамических нагрузок и оценка долговечности работы роторных инерционных виброприводов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. №1. С. 76–81.
9. Иванченко Ф.К., Красношапка В.А. Прикладные задачи динамики машин. Киев: Выща шк., 1983. 200 с.
10. Комратов Ю.С., Лехов О.С. Реконструкция и развитие сталеплавно-прокатного комплекса (На примере Нижнетагильского металлургического комбината). Екатеринбург: Аквапресс, 2001. 136 с.
11. Митюшов Е.А., Берестова С.А. Теоретическая механика: учебник для вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 320 с.
12. Дьяконов В. Mathcad 8/2000: специальный справочник. СПб.: Питер, 2000. 592 с.: ил.
13. Определение усилия обжатия заготовок на радиально-ковочной машине AVS / Карамышев А.П., Паршин В.С., Некрасов И.И. и др. // Металлург. 2009. № 3. С. 61–63.
14. Разработка технологии и машины для подготовки концов теплообменных труб из коррозионноустойчивых сталей аустенитного класса к волочению / Карамышев А.П., Паршин В.С., Некрасов И.И. и др. // Современные металлические материалы и технологии (СММТ 2013): труды международной научно-технической конференции. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 774 с.
15. Подготовка концов труб перед волочением на радиально-ковочной машине AVS / Карамышев А.П., Паршин В.С., Некрасов И.И. и др. // Металлург. 2008. № 9. С. 40–41.

## MATHEMATICAL MODEL BUILDING OF DYNAMIC LOADING OF LEVER RADIAL-FORGING MACHINE

**Parshin Vladimir Sergeevich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

**Karamyshev Andrey Pavlovich** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

**Chygrynskiy Alexey Evgenevich** – Postgraduate Student, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: Alexey\_Chigrinskiy@mail.ru.

**Chumakova Larisa Aleksandrovna** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

**Nekrasov Igor Ivanovich** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

**Abstract.** The article deals with calculation and selection of the model for studying dynamic loading of the lever radial-forging machine drive. The authors have developed and analyzed a computational scheme and have arrived at a system of difference equations for studying dynamic processes in a driveline of a lever radial-forging machine. Calculation of dynamic loading has been outlined. Formulae for calculation and reduction of inertia moments, stiffness and moments factored in calculation of elastic links have been presented. Selection of a dynamic simulation model has been proved. The difference equation system for calculation of dynamic loading of the lever radial-forging machine drive has been presented.

**Keywords:** Forging, lever radial-forging machine, dynamic simulation model, inertia moment, stiffness of links, reduction of drive links, dynamic loading, difference equation systems of mass motion.

### References

- Ibragimov F.G., Kokovikhin A.V., Kandaurov L.E. Residual deformation test of a lining plate of a roll mill stand allowing for dynamic impact stress. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2006, no. 1, pp. 48-50.
- Zhirkin Yu.V., Mironenkov E.I., Sultanov N. L., Tyuteryakov N. Sh., Yusupov R. R., Alexandrov A.A. Development of a mathematical model of rolling bearings contact and hydrodynamic calculation to improve their performance at the design stage. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov* [Mechanical equipment of metallurgical plants]. 2013, no. 2, pp. 115-120.
- Rodionov N. A., Sotnikov A.L., V. V Zurba. Study of influence of inertial loads on loadings of knuckle-lever billet-caster oscillator. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 4, pp. 70-73.
- Ivanchenko F.K., Krasnoshapka V.A. *Dinamika metallurgicheskikh mashin* [Dynamics of metallurgical machines]. Moscow: Metallurgy, 1983. 295 p.
- Ivanchenko F.K., Polukhin P. I., Tylkin M. A., Polukhin V.P. *Dinamika i prochnost' proklatnogo oborudovaniya* [Dynamics and durability of rolling equipment]. Moscow: Metallurgy, 1970. 486 p.
- Lekhov O. S. *Optimizatsiya mashin dlya deformatsii nepreryvnoilykh zagotovok* [Optimization of machines for continuous-cast blank working]. Yekaterinburg: UIF "Nauka", 1995. 181 p.
- Antsupov A.V., Antsupov A.V., Antsupov V.P., Slobodyansky M. G., Ovsov A.M. Methodology of a probabilistic estimate of machine component reliability by different criteria. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov* [Mechanical equipment of metallurgical plants]. 2012, no. 1, pp. 28-34.
- Sergeev S.V., Reshetnikov B. A., Sergeev U.S. Study of dynamic loads and estimation of durability of rotary inertia vibration drives. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2008, no. 1, pp. 76-81.
- Ivanchenko F.K., Krasnoshapka V.A. *Prikladnye zadachi dinamiki mashin* [Applied problems of machines dynamics]. Kiev, 1983. 200 p.
- Komratov Yu.S., Lekhov O. S. *Rekonstruktsiya i razvitie staleplavil'no-proklatnogo kompleksa (Na primere Nizhnetagil'skogo metallurgicheskogo kombinata)* [Reconstruction and development of a steelmaking and rolling complex (A study of the Nizhny Tagil Iron and Steel Works)]. Yekaterinburg: Aqva-press, 2001. 136 p.
- Mityushov E.A., Berestova S. A. *Teoreticheskaya mekhanika: uchebnyk dlya vuzov* [Theoretical mechanics: a textbook for students of higher education institutions]. Moscow: "Akademiya" publishing center, 2006. 320 p.
- Diakonov V. *Matkad 8/2000: spetsial'nyj spravochnik* [Mathcad 8/2000: special reference book]. St. Petersburg, 2000. 592 p.
- Karamyshev A.P., Parshin V. S., Nekrasov I.I., and colleagues. Definition of effort of sinking of preparations by radial and forging AVS. *Metallurg* [Metallurgist]. 2009, no. 3, pp. 61-63.
- Karamyshev A.P., Parshin V. S., Nekrasov I.I., and colleagues. Development of a technology and design of a machine aimed to prepare ends of heat-exchange pipes, produced from corrosion-resistant austenitic steel, for drawing. *Sovremennye metallicheskie materialy i tekhnologii (SMMT 2013): Trudy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern metallic materials and technologies (MMMT 2013): International scientific and technical conference proceedings]. SPb.: Polytechnic University, 2013. 774 p.
- Karamyshev A.P., Parshin V. S., Nekrasov I.I., and colleagues. Preparation of pipe ends for drawing on the AVS. *Metallurg* [Metallurgist]. 2008, no. 9, pp. 40-41.

Построение математической модели динамического нагружения рычажной радиально-ковочной машины / Паршин В.С., Карамышев А.П., Чигринский А.Е., Чумакова Л.А., Некрасов И.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 100–104.

Parshin V.S., Karamyshev A.P., Chygrynskiy A.E., Chumakova L.A., Nekrasov I.I. Mathematical model building of dynamic loading of lever radial-forging machine. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 100–104.



# ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 681.5.015.24:681.513.4

## ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ АГРЕГАТАМИ

Парсункин Б.Н., Полухина Е.И., Петрова О.В.

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

**Аннотация.** Рассмотрена актуальная проблема выбора приоритетного производственно-экономического показателя эффективности производственного процесса непосредственно по ходу выплавки стали и внепечной доводки стали в электродуговых технологических агрегатах (ЭТА) при динамической оптимизации энергосберегающим управлением потребления электрической энергии.

**Ключевые слова:** энергосбережение, удельное количество электроэнергии, производительность, себестоимость, энергетический режим, оптимизация управления, ток дуги, подводимое напряжение, электродуговой технологический агрегат, потребляемая мощность, мощность, выделяемая в дуге.

### Введение

Количество выплавленной и прошедшей ковшевую доводку стали в электродуговых технологических агрегатах (ЭТА) устойчиво увеличивается [1].

Поэтому проблема снижения себестоимости технологических процессов в ЭТА за счет уменьшения удельных затрат потребляемой, постоянно дорожающей, электрической энергии, является перспективной и актуальной.

В основу современной концепции повышения производительности и снижения себестоимости технологических процессов в ЭТА заложена идея комплексного использования всех факторов, влияющих на эффективность итоговых удельных показателей производства и ковшевой доводки тонны стали.

К таким основным факторам относятся:

- использование тепла отходящих плавильных газов для подогрева металлошихты и сыпучих материалов перед подачей в электродуговой технологический агрегат;
- частичная замена дорогостоящей электро-

энергии более дешевым природным газом, подаваемым через комбинированные горелки – продувочные фурмы в рабочее пространство;

- использование при шихтовке плавки до 40% жидкого чугуна;

- вдувание порошкообразных углеродосодержащих материалов при вспенивании шлака для экранирования излучения электрических дуг;

- использование энергосберегающих оптимальных режимов управления подводимой к ЭТА электрической мощностью.

### Технологическое обоснование показателей эффективности

Современные высокопроизводительные электросталеплавильные комплексы в составе сверхмощных электродуговых печей, электродуговых агрегатов внепечной доводки стали, установок вакуумирования стали и машин непрерывной разливки стали объединяет необходимость четкой синхронизации технологических операций для достижения максимальной производительности и минимальной себестоимости выплавленной стали.

Причем достижение наилучших итоговых показателей сталеплавильного производства

должно обеспечиваться не только при определении конечных итоговых показателей после завершения производственного процесса, но и в динамике, т.е. в процессе управления каждой технологической операцией.

Основной целью данной работы является определение основных производственно-экономических показателей, необходимых для реализации динамической оптимизации энергосберегающего управления использованием потребляемой ЭТА дорогостоящей электрической энергии.

В электрической дуге, как основном источнике тепловой энергии в ЭТА, распределение падения напряжения  $U_D$  можно определить в соответствии с выражением

$$U_D = a + v \cdot L_D, \quad (1)$$

где  $L_D$  – длина дуги;  $a$  – сумма прикатодного и прианодного падений напряжений, В;  $v$  – градиент потенциала в столбе дуги, В/мм.

В отечественной и зарубежной электрометаллургии наиболее часто, благодаря простоте подвода электрической энергии, используются ЭТА переменного тока.

В этом случае три фазные электрические дуги горят между графитизированными электродами и металлом, являющимся общей точкой соединения типа «Звезда».

Изменение подводимой к ЭТА электрической мощности можно осуществить двумя способами:

- изменением величины подводимого напряжения с использованием переключателя ступеней напряжения печного трансформатора;

- при постоянной величине напряжения изменением значения тока дуги, зависящим от длины дуги  $L_D$  или положения электрода относительно поверхности металла, в соответствии с выражением

$$L_D = 1/v \sqrt{U_{II}^2 - (Ix)^2} - I \cdot r - a, \quad (2)$$

где  $I$  – сила тока дуги фазы, А;  $U_{II}$  – напряжение,

подводимое к электроду фазы, В;  $x = x_T + x_P$  – суммарное индуктивное сопротивление подводящей цепи:  $x_T$  – сопротивление трансформатора, Ом;  $x_{II}$  – сопротивление реактора, Ом;  $r$  – активное сопротивление короткой цепи, Ом.

Потребляемая ЭТА активная (полезная) мощность каждой из трех фаз  $P_A$ , Вт, содержит выделяемую в электрической дуге мощность  $P_D$ , Вт, и потерю электрической мощности в подводящей (короткой) цепи  $P_{IIЭ}$ , Вт.

$$P_A = P_D + P_{IIЭ}. \quad (3)$$

Здесь  $P_D = I^2 \cdot R_D$ ;  $P_{IIЭ} = I^2 \cdot r$ ;  $R_D$  – активное сопротивление электрической дуги, определяемое длиной дуги и зависящее от тока дуги.

Расчетные зависимости длины дуги  $L_D$  от величины рабочего тока дуги при различных величинах напряжения питания печного трансформатора для дуговой сталеплавильной печи (ДСП-180) ОАО «ММК» при  $a = 10 В$  и  $v = 1,5 В/мм$  представлены на рис. 1.

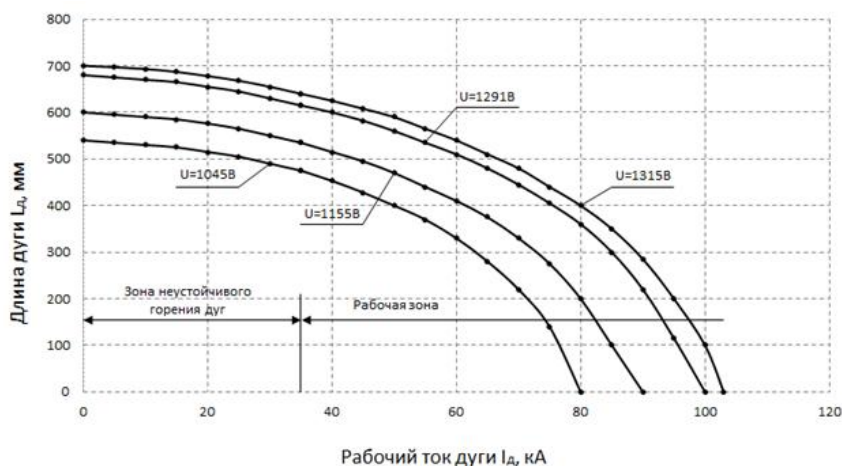


Рис. 1. Зависимости длины дуги от тока дуги для различных ступеней напряжения печного трансформатора ДСП-180 при  $a = 10 В$  и  $v = 1,5 В/мм$

Представленные на рис. 1 зависимости имеют нелинейный вид. Это означает, что коэффициент передачи ДСП по току  $K_T = \Delta I_D / \Delta L_D$  является величиной нелинейной и переменной в зависимости от величины  $\Delta I_D$ . Следовательно

но, для динамического энергосберегающего оптимального управления электрическим режимом ЭТА необходимо использовать адаптивные оптимизирующие алгоритмы управления (ОАУ).

Контролируемая величина активной мощности, потребляемая каждой фазой ЭТА, определяется выражением

$$P_A = I \sqrt{\left( U_{II} / \sqrt{3} \right)^2 - (Ix)^2}, \quad (4)$$

где  $U_{II}, I$  – контролируемые напряжения на выходе печного трансформатора и ток каждой фазы.

В общем случае электрический режим в ЭТА на каждой стадии обработки металла определяется на основании анализа баланса поступления и расхода энергии при конкретном технологическом процессе выплавки стали в ДСП-180 ОАО «ММК» и последующей доводки на агрегатах «печь-ковш» (АПК).

Основными параметрами, определяющими производственные и экономические показатели работы ЭТА, являются:

- продолжительность периода расплавления шихты в ДСП, ч;
- производительность ЭТА –  $G$ , т/ч;
- удельный расход электроэнергии –  $V$ , кВт·ч/т;
- себестоимость готового продукта или технологического процесса ЭТА –  $C$ , руб./т.

Текущие значения названных приоритетных показателей эффективности функционирования ЭТА на каждой текущей стадии технологического процесса зависят от величин текущих значений электрических параметров потребляемой электроэнергии:  $P_A(\tau), P_D(\tau), I(\tau), U_{II}(\tau)$ .

Значит, поддержание оптимального текущего энергосберегающего режима технологического процесса необходимо осуществлять с учетом анализа реальных производственных условий и экономической целесообразности.

Под текущим электрическим режимом понимается величина рабочего тока дуги фазы (длины дуги) при установленной ступени напряжения. При этом рассматривается самый затратный режим работы ДСП при 100% металлургической шихты.

Электрический режим при внепечной доводки стали на АПК эквивалентен режиму работы ДСП в технологические (жидкие) периоды электроплавки.

В основу используемого метода определения эффективности энергосбережения положено уравнение баланса энергии [2] для любой динамической технологической текущей операции:

$$\begin{aligned} W_{ЭЛ} + W_{ЭЛД} + W_{ХИМ} = \\ = \omega_C \cdot G_C + \omega_L \cdot G_L + \\ + \omega_{III} \cdot G_{III} + W_{АКК} + \\ + (P_{ПЭ} + P_{ПТ}) \cdot \tau_P + P_{ПТ} \cdot \tau_{ПР}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $W_{ЭЛ} = (P_D + P_{ПЭ}) \cdot \tau_P = P_A \cdot \tau_P$  – количество электроэнергии, полученное из электрической сети, МВт·ч;  $P_D, P_{ПЭ}, P_A$  – мощность, выделяемая в дуге, мощность электрических потерь, активная мощность соответственно, МВт;  $W_{ЭЛД}$  – количество энергии, полученное от сгорания электродов, МВт·ч;  $W_{ХИМ}$  – количество энергии, выделившееся от экзотермических реакций, МВт·ч;  $\omega_C, \omega_L, \omega_{III}$  – соответственно энергии, затраченные на нагрев и расплавления одной тонны стального лома, легирующих и раскисляющих добавок, шлакообразующих добавок от исходной до конечной температуры МВт·ч;  $G_C, G_L, G_{III}$  – соответственно массы стального лома, легирующих и шлакообразующих материалов, т;  $W_{АКК}$  – энергия, затраченная за время  $\tau_P$  на аккумуляцию тепловой энергии огнеупорной кладкой, МВт·ч;  $P_{ПТ}$  – среднее значение потерь энергии за время  $\tau_P$ , МВт·ч;  $\tau_P$  – текущее время работы ЭТА под током, мин;  $\tau_{ПР}$  – время простоя ЭТА за технологический цикл выплавки или обработки конкретной плавки, мин.

В условиях высокопроизводительного производства сталеплавильные электродуговые агрегаты, как правило, используются для получения расплава металла, нагретого до заданной температуры. Доводка стали по химсоставу и конечной температуре осуществляется в электродуговых агрегатах внепечной (ковшевой) доводки.

С учетом (5) время работы ЭТА под током можно определить в соответствии с выражением

$$\tau_p = \frac{\omega_C \cdot G_C + \omega_L \cdot G_L + \omega_{III} \cdot G_{III} + W_{AKK} - W_{XIM} - W_{ЭЛД} + P_{ПТ} \cdot \tau_{ПР}}{P_D - P_{ПТ}} \quad (6)$$

Если ферросплавы (легирующие) в завалку не даются, то в энергетический период расплавления составляющая  $\omega_L \cdot G_L$  равна нулю.

Из выражения (6) следует, что ни одно из слагаемых числителя явно не зависит от параметров электрического режима и времени работы под током.

Обозначим через  $\Delta W_{ПЕЧИ}$  ту часть тепловой энергии, которая выделяется дугами фаз за время  $\tau_p$  и которая остается в ЭТА:

$$\Delta W_{ПЕЧИ} = \omega_C \cdot G_C + \omega_L \cdot G_L + \omega_{III} \times G_{III} + W_{AKK} - W_{XIM} - W_{ЭЛД} + P_{ПТ} \cdot \tau_{ПР} \quad (7)$$

С учетом (7) можно приближенно считать справедливым выражение

$$\tau_p = \frac{\Delta W_{ПЕЧИ}}{P_D - P_{ПТ}} \quad (8)$$

Из уравнения (8) следует, что минимальное время работы печи под током, т.е. максимальная производительность ЭТА, достигается при максимальной мощности, выделяемой в дуге.

### Показатели эффективности энергосберегающего управления электродуговыми технологическими агрегатами

Расчетные зависимости мощности выделяемой в фазе дуги от тока (длины дуги) при различных значениях напряжения печного трансформатора для ДСП-180 ОАО «ММК» представлены на рис. 2.

Анализ полученных расчетных зависимостей показывает, что максимумы мощности, выделяемые в электрической дуге в зависимости от величины тока дуги, определяемой длиной дуги или положением электрода, при изменении подводимого напряжения смещаются в направлении увеличения силы тока. В соответствии с (6)–(8) зависимость времени работы ЭТА под током  $\tau_p = \varphi$  [7] тоже имеет экстремальный вид, где минимальные значения  $\tau_{p\min}$ , соответствующие максимальной производительности ЭТА, будут снижаться с увеличением подводимого напряжения.

Для сверхмощных ДСП, работающих по современной технологии, характерно использование в шихте жидкого чугуна, применение при-

родного газа и кислорода для продувки ванны при использовании водоохлаждаемых панелей рабочего пространства с вдуванием углеродосодержащих материалов.

Поэтому выражение для определения часовой производительности ДСП имеет вид [3, 4]

$$G(\tau) = \frac{3P_D + P_{ГАЗ} + P_{ЭКЗ} - P_{ПТ}}{340} \quad (9)$$

где  $G(\tau)$  – часовая производительность ДСП;  $P_{ГАЗ}$  – количество энергии, полученное от сжигания природного газа, Вт;  $P_{ЭКЗ}$  – энергия, полученная от физического тепла жидкого чугуна и экзотермических реакций окисления элементов, включая и угар металла при продувке кислородом, МВт;  $P_{ПТ}$  – мощность тепловых потерь, МВт; 340 – расчетное количество энергии, необходимое для расплавления и нагрева 1 т лома, кВт/ч.

В соответствии с методикой расчета материального и теплового баланса и рекомендованной профессором Бигеевым В. А. для условий работы ДСП-180 ОАО «ММК» [6] были рассчитаны зависимости  $G(\tau) = f[I(\tau)]$ , представленные на рис. 3.

Анализ представленных зависимостей показывает, что для каждой ступени напряжения существует такое значение рабочего тока дуги (длины дуги), при котором текущая часовая производительность ДСП достигает максимального значения или минимальной продолжительности работы ЭТА под током.

При всех условиях максимальные значения  $G(\tau)_{\max}$  и минимальные величины  $I_p(\tau)_{\min}$  для выбранной ступени напряжения достигаются при максимальном текущем значении мощности, выделяемой в дуге  $P_D(\tau)_{\max}$ . Это означает, что  $P_D(\tau)$  при выбранной ступени напряжения может быть использовано в качестве оптимизируемого параметра для достижения наилучших производственных показателей работы ЭТА.

В условиях рыночной экономики приоритетное значение для оценки эффективности технологических процессов в ЭТА начинают иметь экономические показатели: удельные затраты дорогостоящей электрической энергии и себестоимость производства единицы продукции (обычно 1 т стали). Причем, как прави-



ло, удельные затраты электроэнергии определяют величину себестоимости стали, выплавленной в ДСП.

Так, для ДСП при использовании дополнительных альтернативных источников тепловой энергии приближенное определение текущего удельного количества электрической энергии рекомендуется осуществлять в соответствии с выражением [7, 8]

$$V[I(\tau)] = \frac{3P_A[I(\tau)] \cdot K_{ПЛ}}{K \cdot G[I(\tau)]}, \tag{10}$$

где  $K_{ПЛ}$  – относительная директивно заданная продолжительность электродугового процесса, ч;  $P_A[I(\tau)]$  – установившееся текущее значение контролируемой активной мощности, МВт;  $G[I(\tau)]$  – расчетное (см. рис. 3) значение часовой производительности ДСП, т/ч;  $K$  – коэффициент выхода годного, %.

Расчетные текущие приближенные значения величин удельных затрат электрической энергии в зависимости от тока дуги для различных величин напряжения представлены на рис. 4.

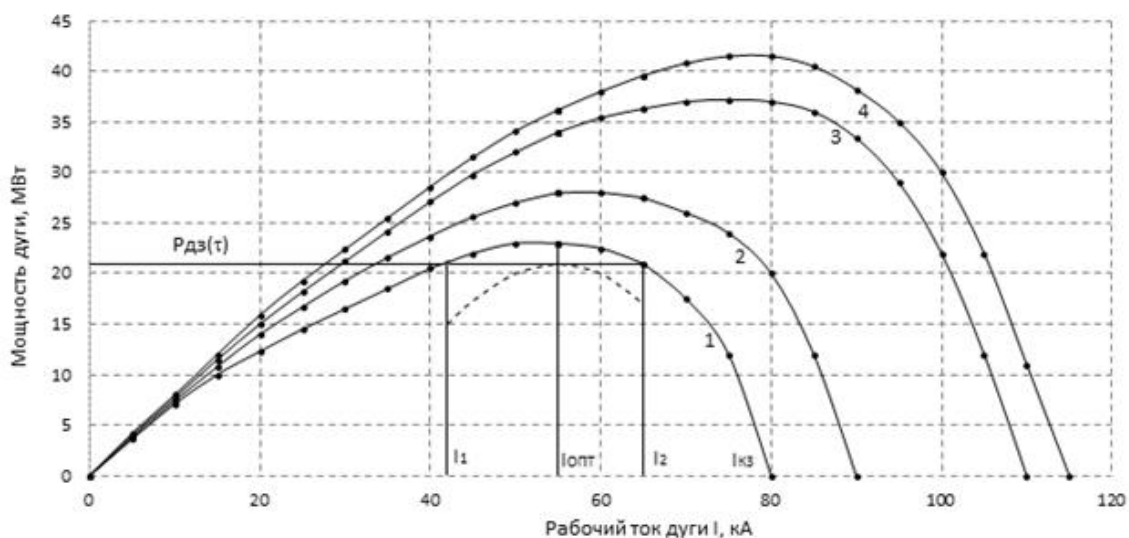


Рис. 2. Расчетные зависимости мощности, выделяемой в дуге фазы, от величины рабочего тока дуги для различных значений напряжения печного трансформатора для ДСП-180 ОАО «ММК» при  $X_p=4,11$  МОм,  $X_T=3,5$  МОм,  $r=0,5$  МОм: 1 – 1045 В; 2 – 1155 В; 3 – 1291 В; 4 – 1345 В

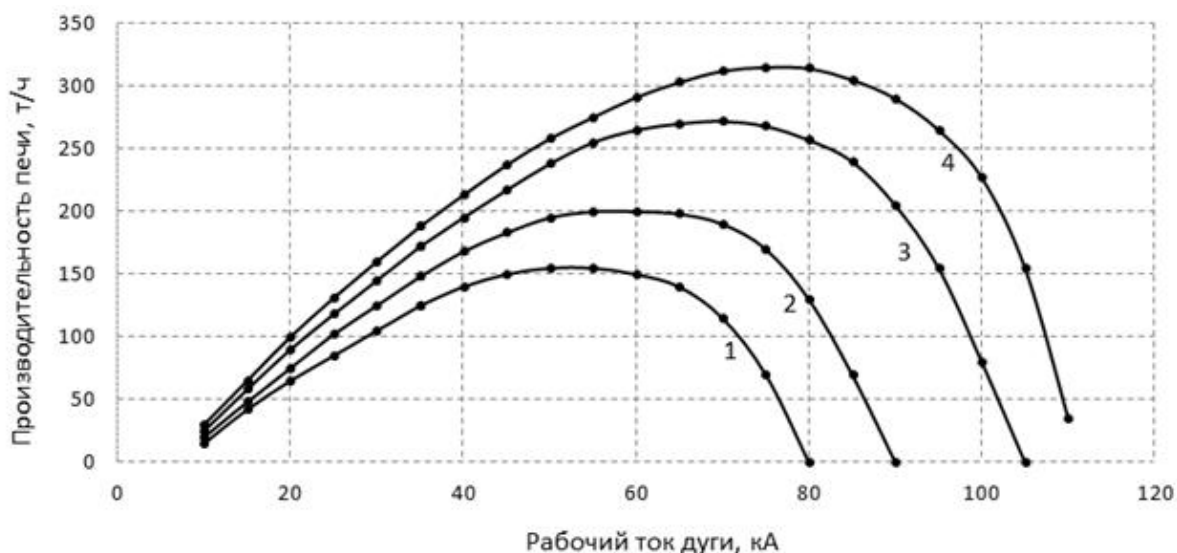


Рис. 3. Расчетные зависимости часовой производительности ДСП-180 от величины рабочего тока дуги при различных значениях напряжения печного трансформатора: 1 – при 1045 В; 2 – при 1155 В; 3 – при 1291 В; 4 – при 1345 В

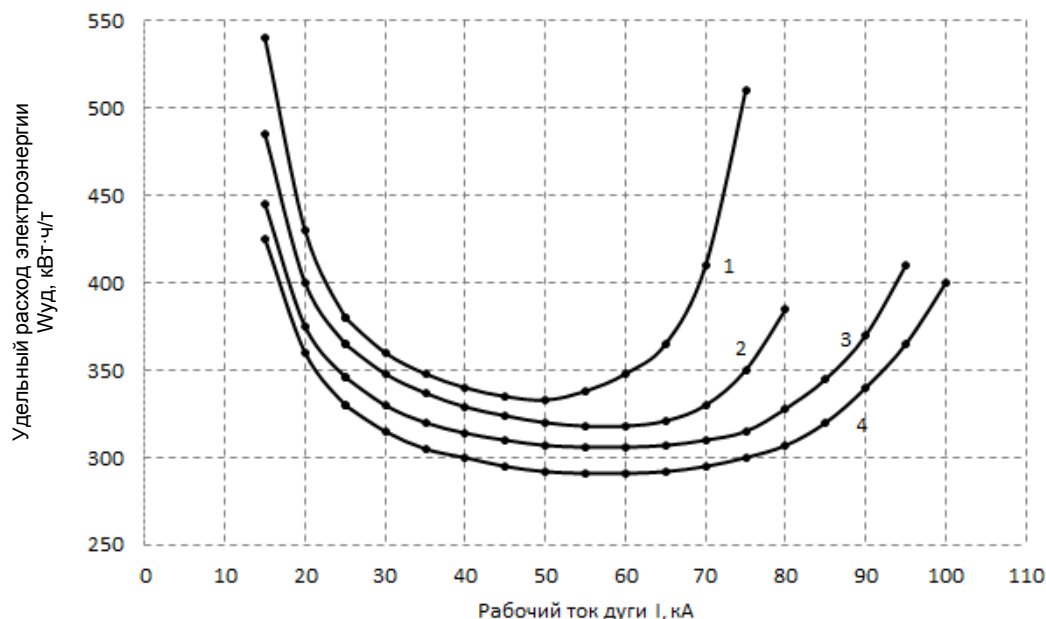


Рис. 4. Расчетные зависимости удельного количества электрической энергии от величины рабочего тока дуги при различных напряжениях печного трансформатора ДСП-180 ОАО «ММК»: 1 – при 1045 В; 2 – при 1155 В; 3 – при 1291 В; 4 – при 1345 В

Минимальная величина  $V(\tau)$  зависит по ходу плавки от ступени напряжения в обратной пропорции и достигается при величинах тока дуги в диапазоне от 50 до 65 кА.

Для оценки точности расчета  $V(\tau)$  используем показатели, полученные при проведении плавки 577406 на ДСП – 2 (27.12.2007) по профилю № 3 при использовании 170 т металлошихты, 50 т жидкого чугуна и при выходе годного 188,8 т. Это обеспечивает суточное производство 4500 т. По экспериментальным данным при суточном производстве 9000 т двух ДСП-180 ЭСПЦ ОАО «ММК» среднее значение удельного количества электроэнергии составило 300 кВт·ч/т. При работе ДСП (см. рис. 4) на напряжении 1291 В при токе 60 кА величина удельных затрат составляет 310 кВт·ч/т. Это вполне достаточный для практической точности результат.

Расчетные зависимости себестоимости выплавки стали в ДСП-180 от текущего значения тока дуги по методике [2] изложены в работе [4] и доказывают существование экстремального вида зависимостей для различных значений напряжений печного трансформатора. Однако использование себестоимости для динамической оптимизации управления технологическим процессом в ЭТА проблематично вследствие практически невозможного определения текущих действительных значений параметров процесса, используемых при расчёте себестоимости [4].

### Заключение

Анализ полученных результатов позволяет обоснованно подтвердить возможность использования зависимостей экономических показателей эффективности работы ЭТА от электрических параметров  $P_A$ ,  $P_D$ ,  $I$ ,  $U_{II}$  при реализации энергосберегающего динамического оптимального управления технологическим процессом.

Наиболее целесообразно в качестве оптимизируемого параметра при динамической оптимизации управления энергосберегающим режимом в ЭТА использовать контролируемое текущее значение активной мощности, подводимой к технологическому агрегату, или расчетное текущее значение электрической мощности  $P_D$ , выделяемой в дуге.

В качестве управляющего воздействия наиболее приемлемо использовать напряжение дуги или полное сопротивление подводящей цепи, зависящее от положения электродов каждой автономно управляемой фазы от уровня металла или тока дуги.

### Список литературы

1. Бигеев А.М., Бигеев В.А. Металлургия стали: учебник для вузов. Магнитогорск: МГТУ, 2000. 544 с.
2. Ефроймович Ю.Е. Электрические режимы дуговых сталеплавильных печей. М.: Metallurgizdat, 1956. 93 с.

3. Свенчанский А.Д., Смоленский М.Я. Электрические промышленные печи. М.: Энергия, 1970. 264 с.
4. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Логунова О.С. Автоматизация и оптимизация управления выплавкой стали в электродуговых печах. Магнитогорск: Из-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 304 с.
5. Автоматизация и оптимизация управления технологическими процессами внепечной доводки стали: монография / Е.Н. Ишметьев, С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин и др. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. 311 с.
6. Особенности материального и теплового балансов ДСП-10 ОАО «ММК» / У.Б. Ахметов, Малофеев А.Е., А.В. Пантелеев и др. // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. Вып. 7. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. С. 84–89.
7. Рябов А.В., Чуманов И.В., Шишимов М.В. Современные способы выплавки стали в дуговых печах: учеб. пособие. М.: Теплотехник, 2007. 192 с.
8. Разработка концепции экстремальной нечеткой системы автоматической оптимизации управления энергетическим режимом выплавки стали в ДСП / Андреев С.М., Парсункин Б.Н., Усачев М.В. и др. // Вестник Магнитогорского технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №3. С. 88–91.

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

## KEY PERFORMANCE INDICATORS FOR A DYNAMIC OPTIMISATION OF THE ENERGY-SAVING ELECTRIC-ARC UNITS CONTROL

**Parsunkin Boris Nikolaevich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Polukhina Ekaterina Ilinichna** – Economist-mathematician, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Petrova Olga Vasilievna** – Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ov\_petrova67@mail.ru.

**Abstract:** The article considers current issues of choosing a priority production efficiency indicator in the direct course of steelmaking and ladle refining in electric arc process units at a dynamic optimisation of the energy-saving power consumption control.

**Keywords:** Energy saving, specific amount of power, performance, cost, power mode, control optimisation, arc current, applied voltage, electric-arc process unit, consumed power, arc-column power.

#### References

1. Bigeev A. M., Bigeev V. A. *Metallurgiya stali: uchebnik dlya vuzov* [Metallurgy of steel: textbook for high schools]. Magnitogorsk: MSTU, 2000. 544 p.
2. Efremovich Y.E. *Elektricheskie rezhimy dugovykh staleplavil'nykh pechej* [Electric modes of arc steelmelting furnaces]. Moscow: Metallurgist publishing, 1956. 93 p.
3. Svenchanskiy A. D., Smolenskiy M. Ya. *Elektricheskie promyshlennye pechi* [Industrial electric furnaces]. Moscow: Energy, 1970. 264 p.
4. Parsunkin B. N., Andreev S. M., Logunova O. S. *Avtomatizatsiya i optimizatsiya upravleniya vyplavkoj stali v ehlektrodugovykh pechakh* [Automation and optimization of steelmaking control in electric arc furnaces]. Magnitogorsk, 2012. 304 p.
5. Ishmetev E.N., Andreev S.M., Parsukin B.N. et al. *Avtomatizatsiya i optimizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi protsessami vnepechnoj dovodki stali: monografiya* [Automation and optimization of steel ladle finishing control: monograph]. Magnitogorsk, 2008. 311 p.
6. Akhmetov U.B., Malofeev A.E., Panteleev A.V. and colleagues Heat-and-mass balance of Arc Furnace - 10 of the Magnitogorsk Iron and Steel Works Group (MМК ОАО). *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva: mezhregional'nyj sbornik nauchnykh trudov Vypusk 7* [Theory and production technology: interregional scientific collection of works, Edition 7]. Magnitogorsk, 2007, pp. 84-89.
7. Ryabov A.V., Chumanov I.V., Shishimov M.V. *Sovremennye sposoby vyplavki stali v dugovykh pechakh: uchebnoe posobie* [Modern steelmaking techniques for arc furnaces: a learning aid]. Moscow: Teplotekhnika, 2007. 192 p.
8. Andreev S.M., Parsunkin B.N., Usachiov M.V. and colleagues. Development of the extremal fuzzy system of the automatic power control optimisation of electric arc furnace steelmaking. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 3, pp. 88-91.

Парсункин Б.Н., Полухина Е.И., Петрова О.В. Производственно-экономические показатели для динамической оптимизации энергосберегающего управления электродуговыми технологическими агрегатами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 105–111.

Parsunkin B.N., Polukhina E.I., Petrova O.V. Key performance indicators for a dynamic optimisation of the energy-saving electric-arc units control. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 105–111.

# ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ. МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 658:504

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МЕНЕДЖМЕНТА ПРЕДПРИЯТИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Майорова Т.В., Пономарева О.С.

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

**Аннотация.** В статье проведен анализ возникновения и развития концепции «экологический менеджмент». Приведены параметры, по которым оценивается экономическая эффективность экологического менеджмента. Авторы предлагают использовать комплексную оценку эффективности, под которой понимается сравнение экономических выгод от улучшения экологических аспектов с ценностью производственной системы. В статье представлены результаты оценки экономических выгод и экономической эффективности экологического менеджмента предприятия металлургической отрасли.

**Ключевые слова:** экологический менеджмент, экологические характеристики, экологическая эффективность, производственная система, ценность производственной системы, экономическая эффективность.

### Введение

Человеческая деятельность и вызываемые ею последствия является сознательным и продуктивным с точки зрения удовлетворения потребностей людей процессом.

До тех пор, пока интенсивность и масштабы человеческой деятельности были не слишком велики, ущерб, наносимый природе, имел локальное значение и биосфера сохраняла способность к самовосстановлению.

В настоящее время глобальные экологические проблемы побуждают человечество перейти к сознательно регулируемому развитию – изъятие вещества и энергии из природной среды должно компенсироваться деятельностью людей по поддержанию равновесного состояния системы «общество – природа».

Первой попыткой такого перехода является концепция устойчивого развития<sup>1</sup> – развития, которое позволяет удовлетворять потребности нынешних поколений, не нанося при этом ущерба возможностям будущих поколений по удовлетворению их собственных потребностей [1].

Роль делового сообщества в обеспечении

устойчивого развития одна из ключевых: бизнес реализует потребности человечества, обеспечивает их ресурсами; определяет эффективность использования ресурсов, осуществляет выбор между истощимыми и возобновимыми ресурсами. В 1991 г. Международной торговой промышленной палатой была принята Хартия «Бизнес и устойчивое развитие», провозгласившая: «Экономический рост создает условия для сохранения экологического равновесия и достижения социальных целей, которые и обуславливают устойчивость развития ... . Бизнес – движущая сила устойчивого развития экономики, он формирует управленческие, финансовые и технические ресурсы для решения проблем состояния окружающей среды» [2, 3].

Одним из корпоративных приоритетов предприятий металлургической отрасли является экологический менеджмент как обеспечивающий систематизацию подходов компаний к вопросам, связанным с состоянием окружающей среды, и включение экологически значимых целей в стратегию бизнеса.

Для металлургических предприятий, характеризующихся высокой природоемкостью, системы экологического менеджмента (СЭМ) являются инструментом конкуренции в экономике как выявляющие наиболее эффективные и ре-

<sup>1</sup> ООН / Отдел устойчивого развития Департамента социальных и экономических вопросов. URL: <http://www.un.org/esa/sustdev/index.html>  
© Майорова Т.В., Пономарева О.С., 2015



зультативные пути социально-экономического развития, способы экологически безопасного производства и хозяйствования.

Стандарты в области СЭМ дают возможность совершенствовать подходы к оценке экологической, экономической и социальной результативности предприятий [4–6].

Очевидно, что эффективный экологический менеджмент приводит к увеличению прибыли и повышает конкурентоспособность компании.

Целью настоящего исследования является определение экономической эффективности экологического менеджмента производственной системы.

### **Теоретические предпосылки определения экономической эффективности экологического менеджмента производственной системы**

Эффективность менеджмента как многогранная категория связана с особенностями многих процессов, происходящих при осуществлении деятельности организации – производственных, финансовых, экологических.

Наиболее общим критерием эффективности менеджмента считается соотношение между целями организации и достигнутыми результатами [7, 8].

Более конкретно эффективность менеджмента можно определить как соотношение результатов и ресурсов (материальных, финансовых, трудовых), затраченных на их достижение.

В качестве основы для определения экономической эффективности экологического менеджмента предлагаем использовать инструменты управления экологическими проблемами организаций и оценки их экологической результативности [4–6]:

– экологические характеристики (*environmental performance*): измеримые результаты, относящиеся к экологическим аспектам;

– производственная система (*product system*): совокупность единичных процессов с элементарными потоками и потоками продукции, выполняющая одну или несколько определенных функций, которая моделирует жизненный цикл продукции;

– ценность производственной системы (*product system value*): ценность или желательность, приписываемые производственной системе;

– показатель экологической эффективности (*eco-efficiency indicator*): показатель, связывающий экологические характеристики производственной системы с ценностью этой производственной системы.

Ключевое понятие СЭМ, позволяющее соотнести деятельность организации и её воздей-

ствия на окружающую среду, – экологический аспект. Под экологическим аспектом [4] понимается элемент деятельности организации, ее продукции или услуг, который может взаимодействовать с окружающей средой.

К экологическим аспектам относятся использование сырья и природных ресурсов, поступление загрязняющих веществ в окружающую среду, размещение отходов, отчуждение земель.

Металлургическое предприятие является источником выбросов и сбросов загрязняющих веществ в атмосферу и водоемы, занимает большие производственные площади, что предполагает отчуждение земель. Все металлургические переделы создают повышенную концентрацию пыли, оксидов углерода и серы в атмосферном воздухе, в аглодомном производстве дополнительно выделяются сероводород и оксиды азота, в прокатном – аэрозоли травильных растворов, пары эмульсий.

Сточные воды металлургического производства загрязнены взвешенными частицами, маслами, эмульсией и травильными растворами.

Основным видом твердых отходов предприятия черной металлургии являются лом, обрезь, стружка, пыль, которые образуются при выпуске и разливке чугуна и стали, резке, прокатке, зачистке металла.

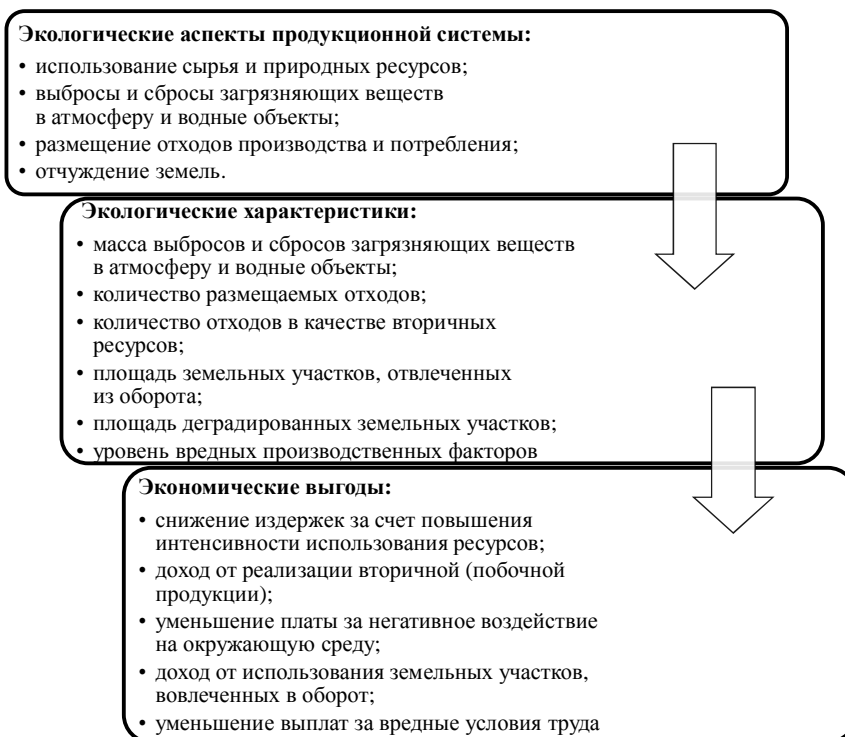
Последовательное улучшение экологических аспектов процесса производства металлопродукции обеспечит ощутимые экономические выгоды: повышение эффективности использования ресурсов, снижение потерь и издержек, сокращение отходов и расходов на их утилизацию, использование вторичного сырья (см. **рисунк**).

В качестве наиболее общего определения экономической эффективности приведем следующее: *экономическая эффективность* – результат производственной деятельности, выражаемый в виде соотношения между итогами хозяйственной деятельности и затратами ресурсов [9, 10].

Для достижения целей настоящего исследования экономическую эффективность определяем как сумму экономических выгод, которые получены при улучшении экологических аспектов производственной системы по отношению к ее ценности.

Оценка экономической эффективности экологического менеджмента производственной системы охватывает производство продукции, ее использование, ликвидацию отходов, т.е. полный жизненный цикл.

Для различных заинтересованных сторон одна и та же производственная система может иметь разную ценность. Ценность производственной системы для потребителя может отличаться от ценности производственной системы для производителя и, в свою очередь, отличаться от ценности производственной системы для инвестора.



### Структурная взаимосвязь элементов производственной системы

К основным типам ценности производственной системы относятся:

- функциональная ценность;
- стоимостная ценность.

Потребители оценивают по функциональной стоимости, ценностью для потребителей может быть готовность заплатить за продукцию.

Стоимостная ценность производственной системы для производителя может выражаться в виде затрат, цены, готовности оплатить, добавочной стоимости, дохода, инвестиций.

В настоящем исследовании предложено стоимостную ценность производственной системы выразить как сумму фактических затрат на улучшение экологических аспектов.

Возрастающая эффективность при одинаковой ценности производственной системы должна соответствовать улучшенным условиям окружающей среды.

Возрастающая эффективность при одинаковом негативном воздействии на окружающую среду должна представлять более высокую ценность производственной системы.

#### Определение экономических выгод, полученных при улучшении экологических аспектов и экономической эффективности экологического менеджмента

Для оценки экономической эффективности экологического менеджмента производственной

системы рассчитана сумма экономических выгод, которые получены при улучшении экологических аспектов предприятия металлургической отрасли<sup>2</sup>.

Экономические выгоды укрупненно определены как предотвращенный ущерб от негативного воздействия на окружающую среду, рассчитанный на основе региональных показателей удельного ущерба [11,12], уменьшение платы за сбросы, выбросы загрязняющих веществ, размещение отходов производства [13], без учета возврата в производство материальных ресурсов.

Эколого-экономическая оценка величины предотвращенного ущерба от негативного воздействия на окружающую среду, руб./год:

$$Y_{np} = Y_{yd} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta M_{npi} \cdot K_{\varepsilon} \cdot K_{инд},$$

где  $Y_{yd}$  – показатель удельного ущерба (цены загрязнения), наносимого единицей (условная тонна) приведенной массы загрязняющих веществ в регионе, руб./усл. т;  $\Delta M_{npi}$  – приведенная масса загрязняющих веществ, снимаемых (ликвидируемых) в результате природоохранной деятельности, усл. т/год;  $K_{\varepsilon}$  – коэффициент, учитывающий экологические факторы: природно-

<sup>2</sup> Экология/экологическая политика. URL: [http://mmk.ru/about/responsibility/ecology/environmental\\_activities](http://mmk.ru/about/responsibility/ecology/environmental_activities)

климатические особенности территорий, значимость природных и социально-культурных объектов;  $K_{инд}$  – коэффициент индексации.

Уменьшение платы за сбросы в водные объекты, выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, размещение отходов производства, руб./год:

$$П = \sum_{i=1}^n \Delta M_i \cdot H_{бнi} \cdot K_3 \cdot K_{инд},$$

где  $\Delta M_i$  – сокращение массы отходов производства, сброса в водные объекты, выброса в атмосферный воздух  $i$ -го ингредиента загрязняющего вещества, т/год;  $H_{бнi}$  – базовый норматив платы по  $i$ -му ингредиенту загрязняющего вещества в пределах установленных лимитов, руб./т;  $K_3$  – коэффициент, учитывающий экологические факторы: природно-климатические особенности территорий, значимость природных и социально-культурных объектов;  $K_{инд}$  – коэффициент индексации к нормативам платы за негативное воздействие на окружающую среду.

Результаты расчета представлены в **таблице**.

**Результаты расчета экономических выгод при улучшении экологических аспектов**

Экологический аспект	Экологические характеристики <sup>3</sup>		Экономические выгоды, млн руб./год	Стоимостная ценность (затраты), млн руб.
	Результат улучшения	Значение, т/год		
Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу	Предотвращение выбросов: – SO <sub>2</sub> , – CO, – пыли	250	1,46	92,3
		500		
		500	3,83	343,7
Сбросы загрязняющих веществ в водные объекты	Предотвращение сброса: – взвешенных веществ нефтепродуктов – сульфатов – нитритов – фторидов – цинка – марганца	2500	46,95	105,4
		50		
		1050	1,91	165,8
		0,97		
		60		
		40		
8,5	156,51	293,2		
44000				
Размещение отходов	Предотвращение размещения	44000	30,42	293,2
	Возврат в производство железосодержащих отходов	120000		
Всего			241,08	1000,4
Комплексный показатель экономической эффективности				0,24

Комплексный показатель экономической эффективности экологического менеджмента производственной системы рассчитан как отношение суммы полученных экономических выгод к величине фактических затрат на улучшение эко-

<sup>3</sup> Экология/природоохранная деятельность URL: [http://mmk.ru/about/responsibility/ecology/environmental\\_activities](http://mmk.ru/about/responsibility/ecology/environmental_activities)

логических аспектов деятельности металлургического предприятия.

### Заключение

Исследование теоретических и методических основ определения экономической эффективности экологического менеджмента происходит на стыке ряда научных областей: менеджмента, экономического анализа, управления экологической деятельностью. По мнению авторов, инструменты управления экологическими проблемами организаций должны быть дополнены оценкой экономической результативности решения экологических проблем.

### Список литературы

1. Основные положения стратегии устойчивого развития России / под ред. А.М. Шелехова [Электронный ресурс]. М., 2002. 161 с. URL: <http://www.duma.gov.ru/sustainable/strategy.htm> (дата обращения: 11.10.2015).
2. Системы экологического менеджмента для практиков / С.Ю. Дайман, Т.В. Островкова, Е.А. Заика, Т.В. Соколькова; под ред. С.Ю. Даймана. М.: Изд-во РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2004. 248 с.
3. International Chamber of Commerce. The Business Charter for Sustainable Development. N.Y.: ICC, 1991. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.iccwbo.org/home/environment\\_and\\_energy/charter.asp](http://www.iccwbo.org/home/environment_and_energy/charter.asp) (дата обращения: 11.10.2015).
4. International Organization for Standardization. ISO 14001:1996 Environmental Management Systems – Specification with Guidance for Use. Geneva: ISO, 1996.
5. International Organization for Standardization. ISO 14004:1996 Environmental Management Systems – General Guidelines on Principles, Systems and Supporting Techniques. Geneva: ISO, 1996.
6. ГОСТ Р ИСО 14045-2014. Экологический менеджмент. Оценка экологической эффективности производственных систем. Принципы, требования и руководящие указания [Электронный ресурс]. М.: Стандартинформ, 2015. URL: <http://docs.cntd.ru> (дата обращения: 11.10.2015).
7. Веснин В.Р. Основы менеджмента: учебник. М.: Проспект, 2011. 320 с.
8. Организация предпринимательской деятельности / К.Ф. Усманова, Г.В. Кузина, Н.В. Банатурский; под ред. К.Ф. Усмановой. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 204 с.
9. Евдокимова Т. В. Анализ генезиса теоретических подходов к понятию и оценке эффективности // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 3. С. 22–27.
10. Усманова К. Ф. Аграрно-промышленный комплекс: проблемы эффективности и предпринимательства: монография. Тюмень: ФГОУ ВПО «Тюменская государственная сельскохозяйственная академия», 2007. 147 с.
11. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба [Электронный ресурс]. М.: Госкомэкология

- РФ, 1999. URL: <http://envi.narod.ru/doc36.htm> (дата обращения: 11.10.2015).
12. Майорова Т.В., Коптякова С.В. Экономика и менеджмент в техносфере: учеб. пособие. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. 128 с.
13. Федеральный закон от 21.07.2014 N 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Электронный ресурс]. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ECONOMIC EFFICIENCY ASSESSMENT METHODOLOGY OF METALLURGICAL INDUSTRY ENVIRONMENTAL MANAGEMENT

**Maierova Tatiana Vladimirovna** – Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [mtv1\\_2010@rambler.ru](mailto:mtv1_2010@rambler.ru)

**Ponomareva Olga Stanislavovna** – Ph.D. (Education), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [slava\\_5@inbox.ru](mailto:slava_5@inbox.ru)

**Abstract.** The article analyzes the rise and development of the environmental management concept. Economic efficiency assessment parameters of environmental management have been given. The authors propose to use a comprehensive efficiency assessment which means the comparison of economic benefits of environmental aspects improvement with the product system value. The article presents the results of assessment of economic benefits and economic efficiency of the metallurgical industry environmental management.

**Keywords:** Environmental management, environmental performance, eco-efficiency, product system, product system value, economic efficiency.

References

1. *Osnovnyie polozheniya strategii ustoychivogo razvitiya Rossii* [Sustainable development, Russian Way]. Ed. A.M. Shelehova. Moscow, 2002. 161 p. Retrieved from <http://www.duma.gov.ru/sustainable/strategy.htm> (2015)
2. Dayman S.Y., Ostrovkova T.V., Zaika E.A., Sokornova T.V. Ed. S.Y. Daymana. *Sistemyi ekologicheskogo menedzhmenta dlya praktikov* [Environmental management systems for practitioners]. Moscow: D.Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 2004. 248 p.
3. International Chamber of Commerce. The Business Charter for Sustainable Development. N.Y.: ICC, 1991. [http://www.iccwbo.org/home/environment\\_and\\_energy/charter.asp](http://www.iccwbo.org/home/environment_and_energy/charter.asp) (2015)
4. International Organization for Standardization. ISO 14001:1996 Environmental Management Systems – Specification with Guidance for Use. Geneva: ISO, 1996.
5. International Organization for Standardization. ISO 14004:1996 Environmental Management Systems – General Guidelines on Principles, Systems and Sup' porting Techniques. Geneva: ISO, 1996.
6. *Natsionalnyiy standart Rossiyskoy Federatsii. GOST R ISO 14045-2014. Ekologicheskiy menedzhment. Otsenka ekologicheskoy effektivnosti produktsionnykh sistem. Printsipy, trebovaniya i rukovodyaschie ukazaniya* [National Standard of the Russian Federation. ISO 14045-2014. Environmental management. Eco-efficiency assessment of product systems. Principles, requirements and guidelines]. Moscow: Standartinform, 2015. Available at <http://docs.cntd.ru> (2015)
7. Vesnin V.R. *Osnovyi menedzhmenta* [Basics of Management]. Moscow: Prospekt, 2011. 320 p.
8. Usmanova K.F., Kuzina G.V., Banaturskiy N.V. Ed. K.F. Usmanova. *Organizatsiya predprinimatelskoy deyatel'nosti* [Organization of business activities]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014. 204 p.
9. Evdokimova T. V. Analysis of the genesis of theoretical approaches to the concept and assessment of effectiveness. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Vestnik of the Tomsk State University]. 2013, no. 3, pp. 22–27.
10. Usmanova K.F. *Agrarno-promyshlennyi kompleks: problemy ehffektivnosti i predprinimatel'stva: monografiya* [Agro-industrial complex: The problems of efficiency and entrepreneurship: monograph]. Tyumen State Agricultural Academy, 2007. 147 p.
11. *Vremennaya metodika opredeleniya predotvraschennogo ekologicheskogo uscherba* [Temporary method of determining the prevented environmental damage]. Moscow: Goskomekologiya RF, 03.09.1999 Available at <http://envi.narod.ru/doc36.htm> (2015)
12. Maierova T.V., Koptyakova S.V. *Ekonomika i menedzhment v tehnosfere* [Economics and Management in the technosphere]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2008. 128 p.
13. *Federalnyiy zakon ot 21.07.2014 N 219-FZ "O vnesenii izmeneniy v Federalnyiy zakon "Ob ohrane okruzhayushey sredy" i otdelnyie zakonodatelnyie aktyi Rossiyskoy Federatsii"* [Federal law "On amendments to the Federal law "On environmental protection" and certain legislative acts of the Russian Federation" of 21.07.2014 No. 219]. Available at <http://base.consultant.ru> (2015)

Майорова Т.В., Пономарева О.С. Методика оценки экономической эффективности экологического менеджмента предприятий металлургической отрасли // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 112–116.

Maierova T.V., Ponomareva O.S. Economic efficiency assessment methodology of metallurgical industry environmental management. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 112–116.



# ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 658

## СТРАТЕГИИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ МОДЕРНИЗАЦИИ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Болгова М.А., Подлегаев А.В.

Российский государственный университет туризма и сервиса, Москва, Россия

**Аннотация.** В статье представлен ретроспективный анализ стратегий деятельности образовательной организации высшего образования, ключевые моменты механизма стимулирования эффективной работы вуза, излагается авторский подход к разработке основных направлений модернизации вузов как неразрывной системы.

**Ключевые слова:** модернизация, стратегия адаптации вузов, стагнация, диверсификация, глобализация, максимальное качество, реформирование.

### Введение

Модернизацию экономики в нашей стране и во всем мире невозможно осуществлять без такого условия, как подготовка кадров высшей квалификации, в связи с чем возникает необходимость реформирования российского образования в целом.

На наш взгляд, образовательные организации высшего образования в каждый период времени выбирают наиболее подходящую стратегию деятельности в той ситуации, в которой они находятся (уровень их менеджмента необходимо рассматривать как часть этой ситуации). Чем типичнее положение вуза во множестве вузов, отнесенных к той или иной стратегии, тем он наиболее полно отражает тот комплекс условий, в котором находятся данные вузы. Можно сказать, что поведение типичных вузов зависит от той среды, в которой они действуют и от наличия ресурсов, которыми они располагают. По мере уменьшения типичности начинает проявляться неоптимальность, с одной стороны, или неординарность, с другой, деятельности рассматриваемого вуза.

Так называемый типичный вуз – наиболее яркий пример способа адаптации таких учебных заведений к сложившимся условиям внешней среды, в том числе к дефициту бюджетного фи-

нансирования. Он же показывает достигнутый и возможный для данного класса вузов уровень менеджмента. Требование изменения ситуации для типичного вуза — это вывод его из некоторого равновесия, с чем наличный менеджмент вуза может просто не справиться. Полученная в ходе социологического исследования картина типичного вуза — это картина оптимального поведения для данной стратегии.

По мере уменьшения типичности нарастает «неоптимальность» деятельности для конкретных условий соответствующего вуза, связанная, прежде всего, с фактором управления. Атипичный вуз – это вуз, чье поведение не вписывается или плохо вписывается в данную стратегию. При этом ситуация может резко отклоняться как в лучшую, так и в худшую сторону.

Еще одна сложность обсуждения вопроса об оптимальности адаптационных схем связана с отсутствием критерия, который позволял бы говорить об улучшении или ухудшении деятельности. Даже такой показатель, как «достижение максимального качества», не может рассматриваться как указанный критерий, хотя анализируется адаптация поведения вуза в финансовой сфере. Тем не менее даже финансовые характеристики его деятельности не являются критериальными, ибо получение финансовых ресурсов не может выступать самоцелью для высшего учебного заведения.

Из сказанного следует, что невозможно привести в порядок стратегию деятельности образовательных организаций высшего образования по предпочтительности и соответственно рассматривать движение к лучшему. Более того, очень вероятно ситуация, когда стратегия деятельности, которая, на первый взгляд, кажется наиболее оптимальной с точки зрения идеальной модели, невозможна из-за условий, в которых действует конкретный рассматриваемый вуз. Это связано с тем, что в процессе экономического и социологического анализов объективно невозможно собрать и обработать всю необходимую (или потенциально имеющуюся) информацию. Следует учитывать, что деление на кластеры, точнее проведение их границ, всегда достаточно условно.

### **Методы исследования. Стратегии адаптация вузов**

В процессе анализа были выделены различные стратегии адаптации вузов. Они различаются как по способу реакции на изменение внешней для вуза среды, так и по характеру использования ресурсов и их комбинации. За исключением стратегии «Стагнация», ни об одной из выделенных стратегий нельзя сказать, что она «плохая». В еще большей степени это утверждение относится к комбинированным стратегиям и к тому набору «чистых» стратегий, которые входят в определенную деятельность вуза. Нельзя точно ответить какую стратегию лучше сочетать – «Максимальное качество» со стратегией «Глобализация» или же с «Финансовым благополучием». Это, в первую очередь, обусловлено как объективными причинами, так и субъективной позицией руководства вуза, определено какими-то внешними условиями или это добровольный выбор, исходя из субъективной позиции. Приведет ли к улучшению положения вуза смена «чистых» стратегий или переход к иной их комбинации – заранее сказать практически невозможно.

Немаловажным моментом как анализа стратегий вузов, так и предложений для политики в сфере высшего образования является сопоставление полученных социологических картин адаптационного поведения вузов, принадлежащих к разным стратегиям.

Помимо объективных условий функционирования вуза (регион, город, тип вуза и его отраслевая принадлежность, уровень социально-экономического развития территории, демографическая ситуация в регионе), а также «стартовых» условий (оснащенность оборудованием, наличие площадей, кадров и т.п.), необходимо выделить субъективный фактор, который во многих случаях играет существенную роль в выборе вузом направлений деятельности. Этот

фактор (факторы) – личность (личности), представляющая высшее руководство вуза, и уровень менеджериальной культуры, достигнутый им.

Проведенные экономическое и социологическое исследования всех образовательных организаций высшего образования, подведомственных Министерству образования и науки Российской Федерации, показывают, что ситуация в настоящий момент относительно финансово-экономического положения и перспективы их дальнейшего развития существенно различаются. Эти отличия нельзя объяснить только региональными и отраслевыми особенностями, профилем деятельности вуза или степенью его рыночной ориентированности, исходным материально-финансовым положением и сложившимся имиджем.

Наши исследования выявили важнейший адаптационный ресурс высших учебных заведений к сложившейся в стране экономико-социальной ситуации — уровень и качество управления. Наиболее ярко это иллюстрирует сопоставительный анализ деятельности «атипичных» вузов (т.е. вузов, попавших в «чужой» по формальным признакам кластер) и аналогичных учебных заведений.

Анализ показал, что даже в рамках одного кластера, т.е. при рассмотрении особенностей вузов, действующих в рамках одной и той же адаптационной стратегии, различие их положения и своеобразие очень велики. Это означает, что нельзя говорить о неких оптимальных финансово-экономических и организационных схемах для каждой из выделенных стратегий, которые позволили бы повысить эффективность функционирования конкретного вуза, улучшить значения результирующих показателей его деятельности и тем более вывести его в другой, более «престижный», кластер.

Подтверждением этой мысли является и то, что в ходе социологического исследования выяснилось следующее: вузы, отнесенные в результате моделирования к одной и той же стратегии, в зависимости от ситуации, собственных особенностей и личностей высших управленцев используют различные конкретные способы реализации данной стратегии.

Это означает, что в современных условиях для выделенных стратегий поведения вузов формально не существует оптимальных финансово-экономических и организационных схем. Вместе с тем может быть предложен набор конкретных действий, относящихся к различным сферам деятельности вузов и приводящих, как правило, к улучшению их положения.

Таким образом, можно сделать вывод, что из полного списка возможных действий вузов, направленных на улучшение их положения, бы-

ли выделены наиболее часто реализуемые и эффективные. Рекомендации по поводу их отбора для конкретных объектов могут носить лишь достаточно общий характер, поскольку не учитывают их специфику.

При описании возможных направлений дальнейшего улучшения деятельности вузов, кроме того, даются предложения по необходимому, как представляется, мерам государственной поддержки системы высшего образования в целом и отдельных вузов в частности.

Также, с нашей точки зрения, являются приводимые ниже среднесрочный и долгосрочный прогнозы развития ситуации по различным секторам высшего образования в случае отсутствия специальных мер государственного регулирования. Вместе с тем рассматриваются возможные способы улучшения положения вузов, которые могли бы стать результатом их собственных действий или могли бы быть инициированы Министерством образования и науки.

Качественный анализ множества вузов, отнесенных к той или иной из «чистых» стратегий, выделенных в результате моделирования, позволяет сделать следующие выводы:

«Максимальное качество» – это стратегия интенсивного развития, которая в основе своей направлена на совершенствование основной деятельности вуза с высоким уровнем качества образования и неплохими финансовыми ресурсами. При этом масштабы непрофильной деятельности и изменение масштабов деятельности носит единственное ограничение – уровень не выше среднего, т.е. они не должны быть высокими. В это множество в основном вошли узкоспециализированные, в ряде случаев уникальные, и, как правило, столичные (московские и санкт-петербургские) вузы, профиль деятельности которых не носит рыночной ориентации, а также периферийные технические вузы и университеты со старыми традициями.

«Финансовое благополучие» – это также стратегия интенсивного развития вуза. В основе данной стратегии – максимизация текущих финансовых результатов основной деятельности вуза. Данная стратегия свойственна для технических вузов, которые находятся в крупных промышленных центрах с неплохим развитием экономики.

«Диверсификация» – стратегия, при которой, с одной стороны, в силу различных причин начинает увеличиваться непрофильная деятельность вуза. Предпосылкой для использования подобной стратегии послужило их неплохое исходное положение, что выражалось, прежде всего, в наличии хороших учебных зданий, общежитий, а в ряде случаев и оборудования. С другой стороны, причиной данного развития послужила небольшая емкость того рынка образова-

тельных услуг, на который они были первоначально ориентированы.

«Глобализация» – стратегия количественного роста основной деятельности вуза. Сюда можно определить университеты из не очень крупных городов, а также периферийные вузы архитектурно-строительного и педагогического профилей.

«Консервативная» – это стратегия, с устойчивой политикой, для которой не характерно существенное изменение каких-либо параметров деятельности. Данной стратегии придерживаются классические университеты, а также технические, педагогические, архитектурно-строительные вузы, которые располагаются в крупных и средних промышленных городах.

«Стагнация» – стратегия, которую можно охарактеризовать ухудшением большей части показателей результата. В это множество попали в первую очередь региональные вузы и удаленные от столицы классические университеты. Кроме того, в нем оказались также профильные вузы, деятельность которых в настоящее время крайне востребована на рынке труда: финансово-экономические, юридические, архитектурно-строительные, сервиса. Однако уровень качества предоставляемых образовательных услуг не позволяют им найти своего потребителя или же заказчика.

### Заключение

В перспективе при благоприятном финансово-экономическом и социальном развитии России можно ожидать постепенного объединения стратегий «Максимальное качество» и «Финансовое благополучие».

Так, для вузов, которые относятся к последней стратегии, уже сейчас можно сделать вывод о постепенном «переходе количества в качество». Расширение перспективных с точки зрения получения внебюджетных средств направлений их деятельности, с одной стороны, делает необходимым повышение качества образовательных услуг, а с другой – предоставляет такую возможность. В частности, появляется возможность привлечения более сильного профессорско-преподавательского состава, появляется возможность повышать квалификацию сотрудникам, как административно-управленческому составу, так и профессорско-преподавательскому, использовать и совершенствовать современные образовательные технологии обучения, создавать и пополнять электронные библиотечные фонды и т.п. Стратегия «Максимальное качество» не может функционировать без привлечения достаточных для реализации всего вышеперечисленного финансовых ресурсов, так как в это рано или поздно может привести к постепенному «сгоранию» тех материальных, интеллектуальных и иных

ресурсов, которые позволили вузу занять лидирующие позиции по качеству образования.

В связи с этим нельзя не прийти к парадоксальному на первый взгляд выводу о том, что, несмотря на кажущуюся с точки зрения общества предпочтительность стратегии «Максимальное качество», бюджетные средства должны примерно в равной пропорции выделяться представителям обеих стратегий. По крайней мере до тех пор, пока у финансово благополучных вузов внебюджетные средства не будут в значительной мере превышать бюджетные.

В связи с тем, что, с одной стороны, значительная часть внебюджетных средств вузов, использующих стратегию «Максимальное качество», поступает от обучения студентов на платной основе, а с другой – такие вузы предоставляют образовательные услуги с заведомо высоким уровнем качества, что соответствует интересам экономического и социального развития страны, Министерству образования может быть рекомендовано всячески поддерживать указанные учебные заведения. Для того, чтобы не допустить искажения конкурентной ситуации, подобные меры, видимо, должны носить преимущественно косвенный характер.

В то же время социологическое обследование вузов показало, что в ряде случаев платный прием по пользующимся у абитуриентов спросом специальностям ограничен имеющимися учебными площадями. Следовательно, действенной мерой поддержки таких вузов явился бы льготный кредит на строительство новых учебных корпусов.

Неустойчивая экономико-социальная ситуация в стране явилась основной причиной возникновения стратегии «Глобализация». По аналогии с тем, как средние и крупные промышленные предприятия в такой ситуации в целях укрепления стабильности положения расширяют поле своей деятельности, также и образовательные организации высшего образования во время переходного периода использовали максимальное число всевозможных форм предоставления образовательных услуг. В зависимости от смены обстановки на рынке труда прибыльными становились то одни, то другие направления подготовки, которые обеспечивали жизнедеятельность вуза в целом. Поглощение этими вузами небольших, в некоторых случаях периферийных, учебных заведений высшего и среднего профессионального образования (превращение последних в филиалы рассматриваемых вузов) напоминает стратегию, известную в бизнесе под названием «Зонтик», при которой поглощаемые хозяйственные объекты начинают развиваться, используя имидж крупных и хорошо известных компаний. Близко к использованию бизнес-

стратегии «Зонтик» и создание рассматриваемыми вузами филиалов и представительств в различных регионах.

Предпосылками для перехода вузов к стратегии «Глобализация» служили их исходно большие размеры, развитая материально-техническая база, квалифицированные кадры, наличие большого рынка предоставляемых ими образовательных услуг и т.д.

Если в России начавшийся экономический рост сохранится, можно предположить, что количество вузов, использующих указанную стратегию, не будет, как минимум, увеличиваться. Достаточно вероятно, что часть вузов, которые в настоящий момент попали в данную стратегию, перейдут в другие множества. Это может быть связано с тем, что в более стабильной ситуации на смену преобладающему для данной группы вузов критерию деятельности «Максимальная устойчивость» придет критерий «Максимальная эффективность», а это неизбежно приведет к закрытию или «отсечению» наименее перспективных форм и способов деятельности. Точно так же можно ожидать попыток отделения наиболее эффективно функционирующих подразделений, которым надоеет роль доноров. Последнее особенно вероятно в ситуации, когда доходы от деятельности относительно небольшого числа подразделений распространяются на большой по масштабам объект, именуемый вузом.

При отсутствии активных действий вузов, попавших в стратегию «Консервативная», или же активного и целенаправленного использования по отношению к ним различных мер государственного регулирования они с течением времени неизбежно израсходуют имеющиеся в их распоряжении в настоящее время различного рода ресурсы. Подобное физическое и моральное старение постепенно вызовет переход данных вузов к стратегии «Стагнация».

Решение относительно необходимости государственной поддержки данных вузов и относительно ее формы должно исходить из того, какие причины, внешние или внутренние, преобладали при выборе конкретным вузом рассматриваемой стратегии развития, а также из того, какие меры окажутся в каждой из ситуаций наиболее эффективными.

Ситуация, при которой значительная часть периферийных вузов попала в стратегию «Стагнация», во многом противоречит складывающейся концепции развития страны. В первую очередь это относится к педагогическим вузам, поскольку в отдаленных регионах наблюдается резкое старение педагогических кадров. В усло-



виях низкой мобильности населения России и демократизации системы трудоустройства выпускников вузов проблема обеспечения школ учительскими кадрами во многих регионах страны становится крайне острой. В то же время следует учитывать, что в случае, если уровень подготовки, который они обеспечивают, будет недостаточно высок, искусственное поддержание «наплаву» подобных вузов не приведет к решению вопроса. В ряде случаев выходом может стать использование для помощи этим учебным заведениям отработанных в других вузах технологий, в частности, дистанционного образования, средства на развитие которых должны выделяться государством.

Естественным ограничением дополнительного финансирования, видимо, должно являться требование использования этих средств лишь на профильные направления, выпуск специалистов по которым важен для общества и соответствует концепции развития экономики страны.

Реформирование системы образования в России несет в основном организационно-экономический характер. Оно не несет решений основных проблем, которые определяют качество образования, качество подготовки специалистов, их конкурентоспособность на мировом рынке. Реформирование системы образования не решает проблемы обновления профессорско-преподавательского состава, что грозит снижением или потерей ведущих позиций нашей страны в сферах образования и науки. Эта проблема находится вровень с демографической проблемой и представляет большую угрозу России. Она не базируется на научно обоснованных прогно-

зах потребности российской экономики в специалистах с высшим образованием на дальне-, средне- и краткосрочные периоды по различным направлениям и специальностям для страны в целом, регионов и отраслей экономики, социальной сферы.

#### Список литературы

1. Реформы образования в современном мире: глобальные и региональные тенденции. М., 2014.
2. Сравнительный анализ развития образования в России и ведущих странах мира. Статистическое обозрение. М., 2014.
3. Концепция модернизации российского образования на период до 2020 года. URL: <http://www.минобрнауки.рф>
4. Традиции и инновации в профессиональном образовании. М.: Изд-во МГУ, 2010.
5. Большой толковый словарь русского языка [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://enc-dic.com/>.
6. Информационный портал по внедрению эффективных организационно-управленческих и финансово-экономических механизмов, структурных и нормативных изменений, новаций: 273-фз.рф.
7. Государственная программа РФ «Развитие образования» на 2013–2020 годы. URL: <http://www.минобрнауки.рф/документы/>
8. Банников С.А. Стратегии решения конфликтных ситуаций в организации // Вестник Академии. 2008. № 3. С. 66–67.
9. Болгова М.А. Управление организационной культурой в образовательных организациях высшего образования (занятых в подготовке кадров для индустрии туризма и гостеприимства) // Актуальные проблемы российского законодательства. 2015. №9. С. 4–8.
10. Гаврилов А.Ю., Титова Т.В. Управление и самоуправление в образовательной деятельности // Вестник Ассоциации вузов туризма и сервиса. 2012. №2. С. 64–71.
11. Новикова Н.Г., Мухоморова И.В. Проблемы формирования и реализации государственной политики в сфере высшего профессионального образования и пути их решения // Вестник Ассоциации вузов туризма и сервиса. 2013. №1. С. 62–66.
12. Новикова Н.Г., Мухоморова И.В. Развитие высшего образования в условиях современной экономики // Сервис в России и за рубежом. 2014. Т. 8. №9(56). С. 81–88.

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

### ACTION STRATEGY OF EDUCATIONAL INSTITUTIONS OF HIGHER EDUCATION UNDER CONDITIONS OF HIGHER-EDUCATION UPGRADING IN THE RUSSIAN FEDERATION. SOCIAL AND ECONOMIC ANALYSIS

**Bolgova Maria Alekseevna** – Postgraduate Student, lecturer, Russian State University of Tourism and Service, Moscow, Russia. Phone: +7(495)629-35-03. E-mail: [marybolgova@yandex.ru](mailto:marybolgova@yandex.ru)

**Podlegaev Aleksey Vladimirovich** – State and Municipal Administration manager of the Russian State University of Tourism and Service, Moscow, Russia. Phone: +7(916)567-33-22. E-mail: [alexeypodlegaev@gmail.com](mailto:alexeypodlegaev@gmail.com)

**Abstract:** This article presents a retrospective analysis of an action strategy of an educational institution of higher education and key points of promoting a university performance. The article describes the author's approach to the development of main upgrading lines of higher education as an inseparable system.

**Keywords:** Upgrading, university adaptation strat-

egy, stagnation, diversification, globalization, “highest quality”, renewal.

#### References

1. Renewal of education in the modern world: global and regional trends. Moscow, 2014.
2. Comparative analysis of the development of education in Russia and leading countries of the world. Statistical Review.

- Moscow, 2014.
3. The concept of Russian education upgrading for the period up to 2020. URL: <http://www.минобрнауки.рф>.
4. Tradition and innovation in vocational education. Moscow: Moscow State University Publishing House, 2010.
5. The Great Dictionary of the Russian language. URL: <http://enc-dic.com/>.
6. Information Portal on the implementation of effective organizational management and financial and economic mechanisms, structural and regulatory changes, innovations: 273-fz.rf.
7. State program of the Russian Federation on "Development of Education" for 2013-2020. URL: <http://www.минобрнауки.рф/documentation/>
8. Bannikov S.A. Strategies of conflict resolution in an organization. *Bulletin of the Academy*. 2008, no. 3, pp. 66-67.
9. Bolgova M.A. Management of the organizational culture in educational institutions of higher education (engaged in training specialists in tourism and hospitality industry). *Actual problems of Russian law*. 2015, no. 9, pp. 4-8.
10. Gavrilov A.Y., Titova T.V. Management and self-management in educational activities. *Bulletin of the Association of Universities of tourism and service*. 2012, no. 2, pp. 64-71.
11. Novikova N.G., Mukhomorova I.V. Problems of formation and implementation of the state policy in the field of higher education and their solutions. *Bulletin of the Association of Universities of tourism and service*. 2013, no. 1, pp. 62-66.
12. Novikova N.G., Mukhomorova I.V. Development of higher education in today's economy. *Service in Russia and abroad*. 2014, vol. 8, no. 9 (56), pp. 81-88.

---

Болгова М.А., Подлегаев А.В. Стратегии деятельности образовательных организаций высшего образования в условиях модернизации высшего образования в Российской Федерации. Социально-экономический анализ // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 117–122.

Bolgova M.A., Podlegaev A.V. Action strategy of educational institutions of higher education under conditions of higher-education upgrading in the Russian Federation. Social and economic analysis. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 117–122.

---

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Алексеев Даниил Юрьевич** – студент кафедры технологии обработки материалов, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: danon369@gmail.com.

**Архипов Геннадий Викторович** – директор проектов ООО «РУСАЛ ИТЦ», Красноярск, Россия. Тел.: (8391) 206-37-31. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

**Бережная Галина Андреевна** – канд. техн. наук, доц. кафедры технологии, сертификации и сервиса автомобилей, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: galina\_1609@mail.ru.

**Богатов Александр Александрович** – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Обработка металлов давлением», ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия. E-mail: omd@urfu.ru.

**Богатов Николай Александрович** – д-р экон. наук, первый заместитель генерального директора ООО НПО «Трубная Энергетическая Машиностроительная Продукция», Москва, Россия. E-mail: temp\_@front.ru.

**Болгова Мария Алексеевна** – аспирант, преп. кафедры «Экономика и управление», Российский государственный университет туризма и сервиса, Москва, Россия. E-mail: marybolgova@yandex.ru.

**Валяева Галина Геннадьевна** – канд. экон. наук, доц. кафедры экономики и маркетинга, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: valyaevag@list.ru.

**Вафин Руслан Каримович** – канд. техн. наук, инженер-исследователь научно-исследовательского сектора, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: vafinrk@mail.ru.

**Вдовин Константин Николаевич** – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой литейного производства и материаловедения, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8 (3519) 29-85-30. E-mail: Vdovin@magtu.ru.

**Вильчинский Владислав Борисович** – канд. техн. наук, ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия.

**Ворошилов Денис Сергеевич** – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. Тел.(8391) 206-37-31. E-mail: sibdrug@mail.ru.

**Головизнин Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, зав. кафедрой металлургии и стандартизации, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел: (34793)40053. E-mail: golovz@mail.ru.

**Гущина Марина Сергеевна** – студент кафедры технологии обработки материалов, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: marina.mgn.89@mail.ru.

**Денисюк Сергей Александрович** – заместитель начальника трубопрессового цеха № 2 АО «Волжский трубный завод, Волжский, Россия.

**Дитковская Юлия Дмитриевна** – аспирант кафедры обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия.

**Довженко Иван Николаевич** – канд. техн. наук, доц. кафедры обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. Тел.: (8391) 206-37-31. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

**Довженко Николай Николаевич** – д-р техн. наук, директор института нефти и газа, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», профессор кафедры обработки металлов давлением, Красноярск, Россия. Тел.: (8391) 293-78-46. E-mail: n.dovzhenko@bk.ru.

**Еркушов Владислав Юрьевич** – аспирант, мл. науч. сотрудник кафедры кадастра и геоинженерии, Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия. E-mail: v.erkuшов@gmail.com.

**Ерпалов Михаил Викторович** – младший научный сотрудник, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия. E-mail: m.v.erpalov@urfu.ru.

**Иванова Татьяна Александровна** – канд. экон. наук, доц. кафедры экономики и маркетинга, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

**Карамышев Андрей Павлович** – канд. техн. наук, доц., ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия.

**Колокольцев Валерий Михайлович** – д-р техн. наук, проф., ректор ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

**Конonenko Владимир Николаевич** – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник кафедры кадастра и геоинженерии, Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия. E-mail: kvn54@mail.ru.

**Константинов Игорь Лазаревич** – канд. техн. наук, доц. кафедры обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. Тел.: (8391) 206-37-31. E-mail: ilcon@mail.ru.

**Космацкий Ярослав Игоревич** – канд. техн. наук, заместитель начальника отдела по материалам в отделе технологии производства труб ОАО «РосНИТИ», Челябинск, Россия.

**Лебедева Ольга Сергеевна** – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия.

**Лопатина Екатерина Сергеевна** – канд. техн. наук, доц. кафедры металловедения и термической обработки металлов имени В. С. Биронта института цветных металлов и материаловедения, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. Тел.(8391) 206-36-75. E-mail: eslopatina@mail.ru.

**Майорова Татьяна Владимировна** – ст. преп. кафедры менеджмента, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: mtv1\_2010@rambler.ru.

**Монтянова Антонина Николаевна** – д-р техн. наук, ООО «Технологии закладки выработанного пространства», Москва, Россия. E-mail: 22fill56@bk.ru.

**Набатчиков Дмитрий Геннадьевич** – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры технологии обработки материалов, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8(3519)29-85-25. E-mail: Dmitry.Nabatchikov@chelpipe.ru.

**Некрасов Игорь Иванович** – канд. техн. наук, доц., ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия.

**Нухов Данис Шамильевич** – младший научный сотрудник, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия. Тел.: (950)198-9646. E-mail: danis\_nuchov@mail.ru.

**Парсункин Борис Николаевич** – д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8 (3519) 29-84-32.

**Паршин Владимир Сергеевич** – д-р техн. наук, проф., ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия.

**Песин Александр Моисеевич** – д-р техн. наук, проф. кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8(3519)29-85-25. E-mail: pesin@bk.ru.

**Петрова Ольга Васильевна** – ст. преп., ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8 (3519) 29-85-84. E-mail: ov\_petrova67@mail.ru.

**Подлегаев Алексей Владимирович** – менеджер по специальности «Государственное и муниципальное управление», Российский государственный университет туризма и сервиса, Москва, Россия. E-mail: alexeypodlegaev@gmail.com.

**Покачалов Виктор Владимирович** – канд. техн. наук, доц. кафедры металлургии и стандартизации, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: (34793)40053.

**Полецков Павел Петрович** – д-р техн. наук., проф. кафедры технология обработки материалов, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8(3519)29-85-25. E-mail: pavel\_poletskov@mail.ru.

**Полухина Екатерина Ильинична** – экономист-математик, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8 (3519) 26-11-16.

**Пономарева Ольга Станиславовна** – канд. пед. наук, доц. кафедры менеджмента, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: slava\_5@inbox.ru.

**Пузанкова Евгения Александровна** – канд физ.-мат. наук, зав. кафедрой высшей математики №2, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: janny70@mail.ru.

**Пустовойтов Денис Олегович** – канд. техн. наук, доц. кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8(3519)29-85-25. E-mail: pustovoi-tov\_den@mail.ru.

**Пыхов Леонид Эрнстович** – начальник центральной заводской лаборатории ОАО «БМК», Белорецк, Башкортостан.

**Реснт Наталья Анатольевна** – канд. экон. наук, доц. кафедры экономики и маркетинга, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

**Рудницкий Эдвард Анатольевич** – канд. техн. наук, доц. кафедры обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия.

**Савинов Александр Сергеевич** – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой механики, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8 (3519) 29-85-18. E-mail: Savinov\_nis@mail.ru.



**Салихьянов Денис Ринатович** – аспирант, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия. E-mail: salenhall@gmail.com.

**Свердлик Михаил Константинович** – аспирант, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8(3519)29-85-25. E-mail: mikhail-sverdlik@hotmail.com

**Семашко Марина Юрьевна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Машины и технологии обработки металлов давлением», ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», Челябинск, Россия. E-mail: mara1979@mail.ru.

**Сидельников Сергей Борисович** – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. Тел.: (8391) 206-37-31. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

**Синицкий Евгений Валерьевич** – канд. техн. наук, доц. кафедры литейного производства и материаловедения, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8 (3519) 29-85-30.

**Трофимов Андрей Викторович** – канд. техн. наук, ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия.

**Трофимова Виолетта Шамильевна** – канд. экон. наук, доц. кафедры экономики и маркетинга, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

**Феоктистов Николай Александрович** – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры литейного производства и материаловедения, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8 (3519) 29-85-30.

**Феськов Евгений Валерьевич** – аспирант кафедры обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. Тел.: (8391) 206-37-31. E-mail: sbs270359@yandex.ru

**Фокин Николай Владимирович** – инженер лаборатории волочения и прессования ОАО «РосНИТИ», Челябинск, Россия.

**Хрунина Наталья Петровна** – ст. науч. сотрудник, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской Академии наук (ИГД ДВО РАН), Хабаровск, Россия. Тел.: 8(4212) 32-79-27. E-mail: pntex@mail.ru

**Чебан Антон Юрьевич** – ст. науч. сотрудник, доц., Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской Академии наук (ИГД ДВО РАН), Хабаровск, Россия. Тел.: 8(4212) 32-79-27. E-mail: chebanay@mail.ru

**Чигинцев Павел Андреевич** – аспирант кафедры «Машины и технологии обработки металлов давлением», ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», Челябинск, Россия. E-mail: 4iga90@mail.ru.

**Чигринский Алексей Евгеньевич** – аспирант, ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия. E-mail: Alexey\_Chigrinskiy@mail.ru;

**Чумакова Лариса Александровна** – канд. техн. наук, доц., ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия.

**Шеркунов Виктор Георгиевич** – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Машины и технологии обработки металлов давлением», ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», Челябинск, Россия.

## УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей. Журнал формируется по разделам, отражающим основные направления научной деятельности ученых МГТУ, в частности:

- РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.
- МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.
- ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.
- ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО
- ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.
- МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ.
- СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ.
- МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.
- НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.
- ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ.
- УПРАВЛЕНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ.
- СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ.
- ЭКОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ.
- ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ.
- СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ, ПОДГОТОВКА И ОБУЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ.
- ИНФОРМАЦИЯ И ДР.

---

## ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРИНИМАЕМЫМ К ПУБЛИКАЦИИ

### 1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СТАТЬИ (на русском и английском языках)

**1.1. Наименование** статьи (не более 15 слов). Должно кратко отражать содержание статьи. Не рекомендуется использовать сокращения и аббревиатуры.

**1.2. Аффiliation.** Указывается фамилия, имя, отчество авторов (транслитерация), ученая степень, звание, должность, полное название организации (ее официально принятый английский вариант), адрес электронной почты хотя бы одного из авторов.

**1.3. Аннотация** (100-250 слов). Включает гипотезу, цель, эксперименты и методы, основные результаты, применение результатов исследования в промышленности (излагается в прошедшем времени).

**Онлайн-перевод запрещается!**

**1.4. Ключевые слова:** от 5 до 15 основных терминов.

### 2. СТРУКТУРА ОСНОВНОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ

**2.1. Введение** (постановка проблемы)

**2.2. Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки**

**2.3. Результаты исследования и их обсуждение**

**2.4. Заключение** (выводы)

**2.5. Список литературы** (на русском и английском языках)

### 3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

**3.1.** Рекомендуемый объем статьи – 6-8 стр.

**3.2.** Текст статьи, сведения об авторах, аннотация ключевые слова и список литературы представляются на электронном носителе в виде файла, созданного средствами **Microsoft Word**, и распечаткой на стандартных листах бумаги формата А4.

При наборе статьи в **Microsoft Word** рекомендуются следующие установки:

- **шрифт** – **Times New Roman**, размер – 14 пт, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- при вставке **формул** использовать встроенный редактор формул **Microsoft Equation** со стандартными установками, применяется только сквозная нумерация;
- **рисунки и фотографии**, вставленные в документ, должны быть четко выполнены, допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров (толщины линий и размеры обозначений должны обеспечивать четкость при уменьшении рисунка до рациональных размеров), в форматах \*.TIF, \*.JPG, с разрешением **не менее 300 dpi**, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов. Максимальный размер рисунка с подписью – 150×235 мм. В тексте статьи должны быть 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»).