

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного
технического университета им. Г. И. Носова

№3 (43) сентябрь 2013 г.

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, а также входит в базы данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) и ВИНТИ. Электронные версии журнала размещаются на сетевом ресурсе Научной Электронной Библиотеки в сети Интернет.

Издается с марта 2003 года

Редакционный совет

Председатель редсовета:

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

Члены редсовета:

А.В. Дуб – ген. директор ОАО НПО
«ЦНИИТМАШ», д-р техн. наук;

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

В.Ф. Рашинов – Президент ООО «Управляющая
компания ММК», проф., д-р техн. наук;

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

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

К. Мори – профессор Технологического универси-
тета, г.Тойохаси, Япония;

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

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

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

Р.О. Дюссан – Профессор, Руководитель фа-
культета металлургических технологий и
наук о материалах, Технологический инсти-
тут, Мумбаи, Индия.

Главный редактор:

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

Первый зам. главного редактора:

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

Зам. главного редактора:

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

Ответственные секретари:

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

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

Редактор: Н.В. Кутекина.

Технический редактор: Г.Н. Лапина.

© ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2013

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

Также подписку в оперативном режиме можно оформить и заплатить 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 № ФС11-1157 от 18 апреля 2007 г.

Выдано Управлением Федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых комму-
никаций и охране культурного наследия по Уральскому федеральному округу.

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова.
(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38).

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

Адрес редакции:

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

Журнал подготовлен к печати издательским центром МГТУ
им. Г.И.Носова.

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

Подписано к печати 23.09.2013.

Заказ 551. Тираж 1000 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

№3 (43) September 2013

The journal is the English language edition of the Russian scientific research peer-reviewed journal «Vestnik of NMSTU» and is among the highest ranking Russian scientific journals. A wide spectrum of papers covering almost all aspects of recent theoretical and experimental achievements from mining and mineral processing, iron and steel and rolled manufacturing to downstream products processing for different Industries are published. Online versions of the journal can be found in the Scientific Electronic Library collection in the Internet.

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

Editorial Board Members

Chairman:

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

Honorary Board Members:

A.V. Dub – D.Sc., General Director of JSC Research
and Production Association of Central Scientific
Research Institution of Technical Mechanic Engineering.

D.R. Kaplunov – D.Sc., Prof., corresponding member
of Russian Academy of Science.

V.Ph. Rashnikov – D. Sc., Prof., President of LTd
«Magnitogorsk Steel and Iron Works
Managing Company».

V.M. Schastlivtsev – D. Sc., Chief of laboratory
in Russian Academy of Science, Academician
of Russian Academy of Science.

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

K. Mori – Prof., Production Systems Engineering department,
Toyohashi University of Technology, Japan.

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

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

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

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

Editor-in-chief:

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

First deputy chief editor:

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

Deputy chief editor:

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

Executive editors:

M.A. Polyakova – Ph.D., assoc. prof.,
Nosov Magnitogorsk State
Technical University.

M.V. Shubina – Ph.D., assoc. prof.,
Nosov Magnitogorsk State Technical
University.

Editor: N.V. Kutekina.

Technical editor: G.N. Lapina.

© Federal state budgetary institution of higher professional education
«Nosov Magnitogorsk State Technical University», 2013

Registration certificate PI № FS11-1157 on April 18, 2007

Issued by the Federal Service for Supervision of Legislation in Mass of Communication and Protection of Cultural Heritage in the
Urals Federal District.

Founder – State Educational Institution «Nosov Magnitogorsk State Technical University»
(455000, Chelyabinsk Region, Magnitogorsk, Lenin prospect, 38)

16+ in accordance with the Federal Law 29.12.10. №436-FL

Editorship address:

455000, Russia, city Magnitogorsk, Lenin prospect, 38
Phone number: (3519) 22-14-93. Fax: (3519)23-57-60
URL: <http://www.vestnik.magtu.ru>
E-mail: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@magtu.ru

Prepared for the publication by NMSTU publishing center
Printed in the Printing NMSTU Area
Signed for press 2013.09.23.
Order 551. Circulation – 1000 items. Free of charge.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых	5	Балонин Н.А., Сергеев М.Б. М-матрицы и кристаллические структуры.....	58
<i>Зарубин М.Ю., Фионин Е.А., Данилец Е.В.</i> Анализ влияния технологических схем выемки горной массы на показатели качества при открытой разработке месторождений полезного ископаемого	5	<i>Чукин М.В., Голубчик Э.М., Кузнецова А.С., Родионов Ю.Л., Кормс И.А., Бухвалов Н.Ю., Касаткин А.В., Подузов Д.П.</i> Разработка композиций многофункциональных сплавов инварного класса с расширенными эксплуатационными характеристиками	62
Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов.....	10	<i>Слабкий Д.В.</i> Механические свойства горячедеформированных материалов на основе механохимически активированной стружки алюминиевого сплава Д-16	66
<i>Мельников И.Т., Пыталев И.А., Мельников И.И., Шевцов Н.С.</i> Теоретические исследования гидротранспорта полидисперсных и полиминеральных отходов обогащительного производства	10	Нanomатериалы и нанотехнологии	69
<i>Медяник Н.Л., Варламова И.А., Калугина Н.Л.</i> Особенности подбора органических реагентов-комплексобразователей квантово-химическим методом для селективного извлечения катионов тяжелых металлов из растворов	14	<i>Харитонов В.А., Усанов М.Ю.</i> Состояние и направления развития непрерывных способов наноструктурирования круглой проволоки	69
<i>Чесноков Ю.А., Леонтьев Л.И., Шешуков О.Ю., Дмитриев А.Н., Витькина Г.Ю., Маришук Л.А.</i> Пирометаллургическая переработка отходов алюминиевого производства	19	Новые технологические процессы и оборудование.....	74
<i>Бигеев В.А., Богдановский А.С.</i> Энергометаллургический комплекс по переработке старых автомобильных шин.....	23	<i>Дерябин И.П., Чабуркина А.С.</i> Применение параметрической методологии проектирования технологических процессов для обработки глубоких отверстий.....	74
Металлургия черных, цветных и редких металлов	27	<i>Белевский Л.С., Исмагилов Р.Р.</i> Опыт изготовления литых стальных рабочих валков станов холодной прокатки из слитков электрошлакового переплава.....	78
<i>Катренов Б.Б., Жумаев К.Ж., Селиванов Е.Н.</i> Влияние медного купороса на динамическую прочность окатышей из медного концентрата	27	<i>Павлова Н.Г., Никитин С.В., Емельяшин А.Н.</i> Исследование условий эксплуатации пресс-ножниц для переработки металлолома с целью повышения их производительности	81
<i>Кабаков Д.Ю., Самохвалов С.Е., Пиптюк В.П., Филатова О.А.</i> Моделирование гидродинамики и теплопереноса расплава стали при дуговом нагреве на установке ковш-печь.....	33	<i>Сергеев С.В., Сергеев Ю.С., Решетников Б.А., Шаламов В.Г.</i> Анализ механизмов формирования погрешностей обработки при проникании вращающихся многолезвийных тел в твердые сплошные среды	85
Литейное производство	38	Энергетика металлургии.....	91
<i>Мошкунев В.В., Столяров А.М.</i> Определение первого порога проницаемости двухфазной зоны в непрерывнолитых сляках из трубной стали	38	<i>Гельман М.В., Брылина О.Г.</i> Исследование устройств силовой электроники с помощью имитационного моделирования	91
Обработка металлов давлением	41	<i>Копцев В.В.</i> Высокоскоростные энергосберегающие горелочные устройства известняковообжиговых печей	95
<i>Дыя Х., Сыгут М.</i> Теоретический анализ износа калибров в процессе прокатки круглых прутков	41	Экономика, управление и рынок продукции	98
<i>Розов Ю.Г.</i> Конечно-элементная модель волочения трубчатой заготовки на профильной оправке в конической матрице	47	<i>Богатырев С.Ю.</i> Оценка человеческого и интеллектуального капитала российских инновационных компаний.....	98
Материаловедение и термическая обработка металлов. Определение свойств металлов и сплавов	51	<i>Еремеев Д.В.</i> Концептуальная модель взаимосвязи конкурентоспособности наукоемкого предприятия и его инновационного потенциала	101
<i>Денисов С.В., Завалицин А.Н., Кожевникова Е.В., Румянцев М.И.</i> Изменение структуры низколегированной стали в процессе производства	51	<i>Васильева Н.Ф.</i> О возможности применения классической модели оптимального размера заказа для управления запасами в чёрной металлургии	106
<i>Мамина Л.И., Баранов В.Н., Безруких А.И., Гильманишина Т.Р., Юрьев П.О.</i> Исследование зависимости смачиваемости используемых в металлургии графитов различного качества.....	55	<i>Пиньковецкая Ю.С.</i> Анализ распределения основных показателей предпринимательских структур в регионах России	109

CONTENTS

Mining and Mineral Processing.....	5	<i>Balonin N.A., Sergeev M.B.</i> M-matrices and crystal structures.....	58
<i>Zarubin M. Yu., Fionin E.A., Danilets E.V.</i> Analysis of the impact of rock mass excavation technological schemes on quality indexes in mineral deposit open mining.....	5	<i>Chukin M.V., Golubchik E.M., Kuznetsova A.S., Rodionov Y.L., Korms I.A., Bukhvalov N.Yu., Kasatkin A.V., Poduzov D.P.</i> Development of invar class multifunctional alloys with enhanced performance characteristics	62
Processing and Recycling Technology of Technogenic Formations and Wastes.....	10	<i>Slabkiy D.V.</i> Mechanical properties of hot deformed materials by mechanically activated aluminum chips D-16	66
<i>Melnikov I.T., Pytalev I.A., Melnikov I.I., Shevtsov N.S.</i> Theoretical research of hydrotransport of polydisperse and polymineral tails of mineral processing industry.....	10	Nanomaterials and Nanotechnologies	69
<i>Medianik N.L., Varlamova I.A., Kalugina N.L.</i> Features of organic complexing agent assortment by quantum chemical method for heavy metal cation selective extraction from solutions.....	14	<i>Kharitonov V.A., Usanov M.Yu.</i> State and ways of continuous method development for round wire nanostructuring	69
<i>Chesnokov Yu.A., Leont'ev L.I., Sheshukov O.Yu., Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu., Marshuk L.A.</i> Pyrometallurgic recycling of aluminum production scraps.....	19	New Technological Processes and Equipment.....	74
<i>Bigeev V.A., Bogdanovsky A.S.</i> Energy metallurgical complex on old automobile tire recycling.....	23	<i>Derjabin I.P., Chaburkina A. S.</i> Application of engineering process design parametric methodology for deep holes machining	74
Metallurgy of Ferrous, Non-Ferrous and Rare Metals.....	27	<i>Belevskiy L.S., Ismagilov R.R.</i> Experience of manufacture of cast steel working rolls of cold rolling mill from electroslag remelting ingots.....	78
<i>Katrenov B.B., Zhumashev K.Zh., Selivanov E.N.</i> Copper sulfate impact on dynamic strength of copper concentrate pellets	27	<i>Pavlova N.G., Nikitin S.V., Emelushin A.N.</i> Research of conditions of press scissors operation for scrap metal processing to increase their productivity.....	81
<i>Kabakov D.U., Samokhvalov S.E., Pityk V.P., Filatova O.A.</i> Modelling of hydrodynamics and heat transfer of the melted steel in a ladle furnace while arc heating is performed.....	33	<i>Sergeev S.V., Sergeev Y.S., Reshetnikov B.A., Shalammov V.G.</i> Analysis of mechanisms of processing error formation in penetrating of rotating multiblade bodies into solid continuum	85
Foundry Engineering	38	Metallurgical Power Engineering.....	91
<i>Moshkunov V.V., Stolyarov A.M.</i> Determination of the first limit of conductivity in the double-phase zone of pipe-steels slabs	38	<i>Gelman M.V., Brylina O.G.</i> Power electronics devices research using simulation modeling	91
Metal Forming	41	<i>Koptsev V.V.</i> High-speed energy-efficient burner devices burner arrangements for rotary lime and rotary cement kilns.....	95
<i>Dyja H., Sygut M.</i> Theoretical analysis of gauges wear in rolling of rounds.....	41	Economics, Management and Production Market.....	98
<i>Rozov Y.G.</i> Finite element model of the tubular blank drawing on the shaped mandrel in the conical matrix	47	<i>Bogatyrev S.Yu.</i> Appraisal of human and intellectual capital of Russian innovative companies.....	98
Materials Science and Heat Treatment of Metals. Determination of Metals and Alloys Properties.....	51	<i>Eremeev D.V.</i> Conceptual model of competitiveness relationship of high technology enterprise and its innovative facilities.....	101
<i>Denisov S.V., Zavalishchin A.N., Koghevnichova E.V., Rumyantsev M.I.</i> Change of microalloyed steel microstructure in manufacturing processing.....	51	<i>Vasilieva N.F.</i> About the possibility of application of the formula for the optimal size of order to manage inventory in ferrous metallurgy	106
<i>Mamina L. I., Baranov V. N., Bezrukikh A.I., Gilmanshina T.R., Yuriev P.O.</i> Research addition wettability used in metallurgy graphite various quality	55	<i>Pinkovetskaya J.S.</i> Analysis of distribution basic indicators of entrepreneurial structures in the regions of Russia.....	109

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 681.142.2:622.271.3

Зарубин М.Ю., Фионин Е.А., Данилец Е.В.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ВЫЕМКИ ГОРНОЙ МАССЫ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО

Аннотация. Рассмотрены актуальные для горнодобывающей промышленности вопросы влияния технологических схем выемки горной массы на показатели качества добываемого полезного ископаемого. В зависимости от типа сложности забоев выделены технологические схемы простой и селективной выемки. Рассмотрено влияние схем валовой, простой и сложной селективной выемки горной массы применяемыми электрическими экскаваторами типа прямой мехлопаты на параметры стабилизации качества полезного ископаемого и затраты.

Ключевые слова: полезное ископаемое, выемочно-погрузочные работы, простая валовая выемка, простая селективная выемка, сложная селективная выемка.

Результаты информационного поиска по вопросам технологии выемочно-погрузочных работ в режиме стабилизации качества полезного ископаемого показали, что данной проблемой занимались в целом ряде научных центров известные специалисты в области горного дела, что обусловлено актуальностью задачи стабилизации качества полезного ископаемого. Большой вклад в решение этих задач внесли В.В. Ржевский, Б.Р. Ракишев, Ф.Г. Грачев, П.П. Бастан, В.Ф. Бызов и др.

Технологические схемы выемки рыхлого полезного ископаемого и вскрыши в настоящее время детально проработаны для разных видов выемочного оборудования. На карьерах Казахстана и стран СНГ наибольшее распространение получили технологические схемы с использованием в качестве выемочного оборудования электрических экскаваторов типа «прямая мехлопата». В основном это различные модели экскаватора ЭКГ с ковшами емкостью $E = 5, 6.3, 8, 10, 12.5 \text{ м}^3$ и в последнее время появились экскаваторы с $E = 15 \text{ м}^3$.

Для экскаваторов разработаны методы расчета основных параметров элементов системы разработки – высота уступа, ширина заходки, ширина рабочей площадки. Для скальных пород при проведении буровзрывных работ (БВР) кроме этого должны соблюдаться определенные требования к высоте развала в зависимости от параметров БВР.

Целесообразно вести работы с минимальными по ширине рабочими площадками, поскольку в этом случае угол наклона рабочего борта увеличивается. Поэтому расчет ми-

нимально возможной ширины рабочей площадки выполняется из условия совмещения процессов выемки и транспортирования горной массы.

Забои разделяют на простые и сложные.

В простых забоях осуществляется валовая выемка, при которой рабочий цикл состоит только из черпания, поворота, разгрузки и обратного поворота выемочного оборудования. Он не содержит никаких дополнительных операций и поэтому является самым коротким по времени, что соответственно обеспечивает максимальную производительность выемочного оборудования (рис. 1).

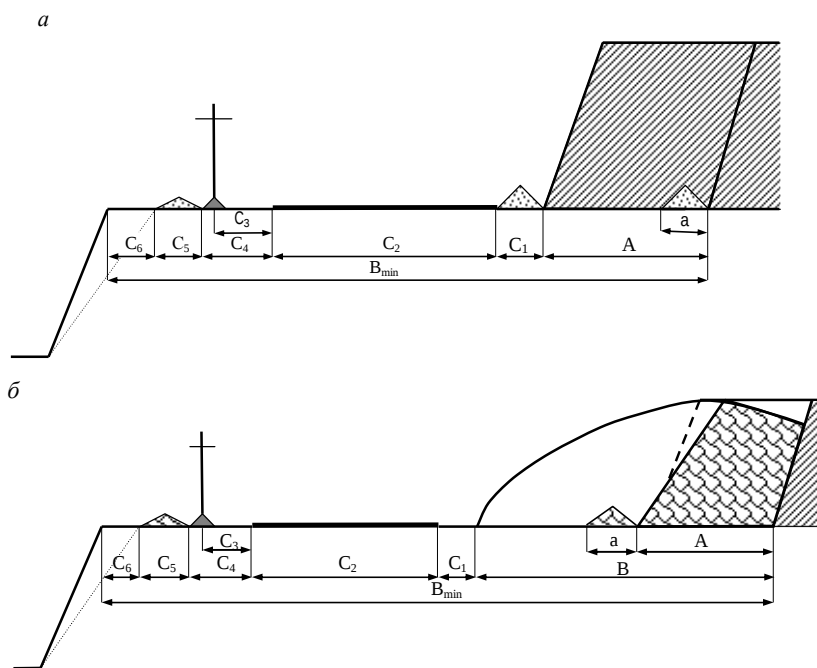


Рис. 1. Схема рабочих площадок с простыми забоями:
а, б – схема рабочей площадки на рыхлых и скальных породах;
 $C_1, C_2, \dots, C_6$ – элементы рабочих площадок; A – ширина заходки (забоя);
 B – ширина развала; a – ширина защитного вала

В сложном забое может встречаться несколько типов или сортов горной массы. Обычно в сложных забоях полезное ископаемое перемежается с прослойками пустой породы.

Степень сложности забоя может быть определена: мощностью рудного или породного включения; числом прослоек полезного ископаемого или пустой породы; формой и углом падения рудных или породных включений; количеством типов или сортов полезного ископаемого в забое, требующих раздельного извлечения.

Условно из всего разнообразия можно выделить четыре типа сложных забоев при отработке рыхлой горной массы [1]. На рис. 2, а, б, в, г отображены их варианты.

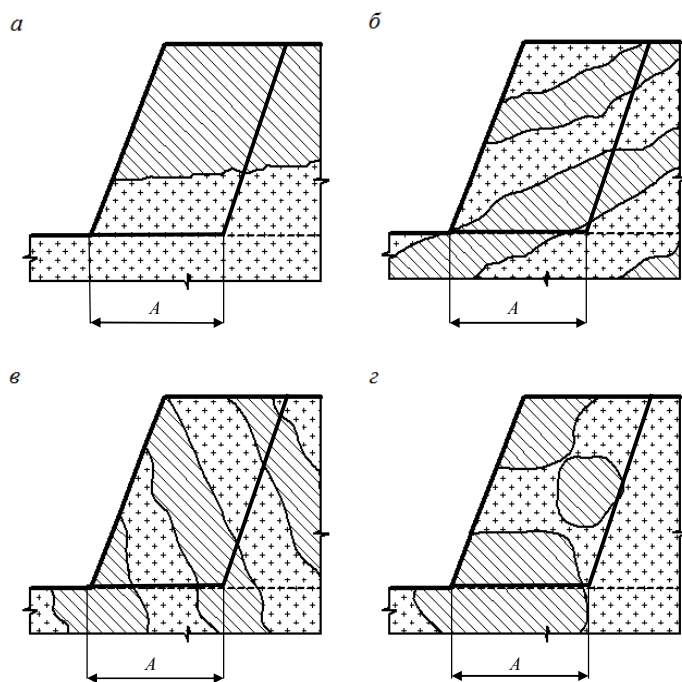


Рис. 2. Основные типы сложных забоев при отработке рыхлой горной массы: а, б, в, г – варианты сложных забоев; А – ширина заходки

Схема а – по высоте забоя наблюдаются два слоя рудных разновидностей (типов или сортов) или только один слой руды и один слой породы; это наиболее простая структура сложного забоя, и при разработке его обеспечивается почти полное извлечение руды при незначительном разубоживании.

Схема б – забой многократно перемежается слоями руд и пород небольшой мощности (до 5 м) горизонтального или слабонаклонного падения; в таких забоях потери и разубоживание тем выше, чем чаще перемежаемость прослоев.

Схема в – забой часто перемежается прослоями руд и пород вертикального или крутонаклонного падения (подобные сложные забои встречаются на Алтын-Топканском, Кара-Тауском, Кайрактинском карьерах).

Схема г – в забоях различные типы или сорта руд и пород представлены телами неправильной или гнездообразной формы (например, Кальмакырский и

ряд железорудных карьеров Урала).

То же самое можно сказать и про расположение полезного ископаемого относительно продольной оси забоя.

Технология выемочно-погрузочных работ в сложных забоях в сочетании с буровзрывным рыхлением оказывает решающее влияние на качество добываемого полезного ископаемого. Валовая выемка здесь не допустима, поскольку приводит к существенному увеличению разубоживания и выходу некондиционного полезного ископаемого, а также и общему увеличению потерь. Это предопределило применение на карьерах различных методов селективной выемки и погрузки.

Различают простую и сложную селективную выемку [2]. Первая состоит в обособленной выемке и погрузке разнотипных горных пород (полезных ископаемых различных типов и сортов, вмещающих пород) по фронту уступа без их сортировки в вертикальной плоскости. Сложная селективная выемка заключается в сортировке разнородной горной массы по высоте уступа, обеспечивая при этом обособленную выемку и погрузку различных типов пород в самых сложных условиях их залегания.

Конкретные технологические схемы селективной выемки весьма разнообразны и определяются типом сложного забоя, применяемым выемочным оборудованием и видом транспорта. В рамках работы, проводимой на грант Министерства образования и науки Республики Казахстан по теме «Разработка ИС поддержки принятия решений по формированию эффективных технологических схем стабилизации качества полезного ископаемого» (№ госрегистрации 0112РК02423) [3], рассмотрены наиболее распространенные схемы.

Схема селективной выемки маломощных крутых и наклонных пластов залежи определяется положением пласта в контурах заходки. При погрузке пород в средства железнодорожного транспорта в этих случаях нашли применение схемы с частичным складированием части пород внутри заходки [4]. Одна из возможных схем приведена на рис. 3.

Экскаватор устанавливается как можно ближе к железнодорожному пути, обрабатывая забой узкой заходкой. При этом полезное ископаемое 1 отгружается прямо в думпкары, а часть вскрыши 2 отсыпается в навал внутри заходки 2' у откоса уступа. После отработки горной массы из узкой заходки на величину максимального радиуса черпания экскаватор отходит назад и отгружает вскрышные породы из навала 2' и из оставшейся части заходки 3.

При отработке сложного забоя с залеганием пласта полезного ископаемого под углом до 30° может быть использована схема с подработкой верхней рыхлой породной части бульдозером [4]. На рис. 4 отображена такая технологическая схема выемочно-погрузочных работ.

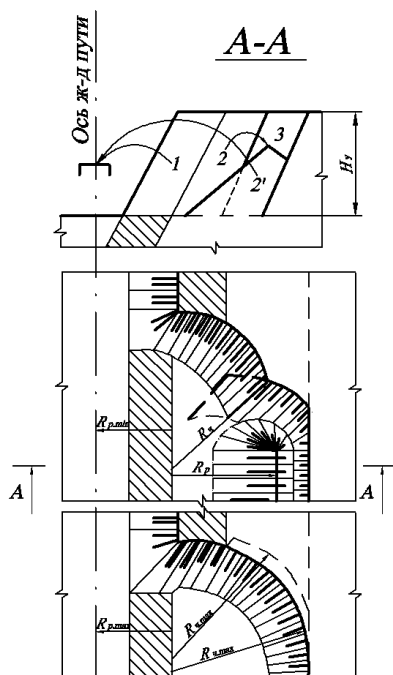


Рис. 3. Простая селективная выемка при крутом падении пласта с погрузкой в железнодорожный транспорт: 1, 2, 2', 3 – последовательность отработки узких заходок и навала; R_p – радиус разгрузки; $R_{p.min}$ – минимальный радиус разгрузки; $R_{ч.макс}$ – радиус черпания; $R_{ч.макс}$ – максимальный радиус разгрузки; H_y – высота уступа

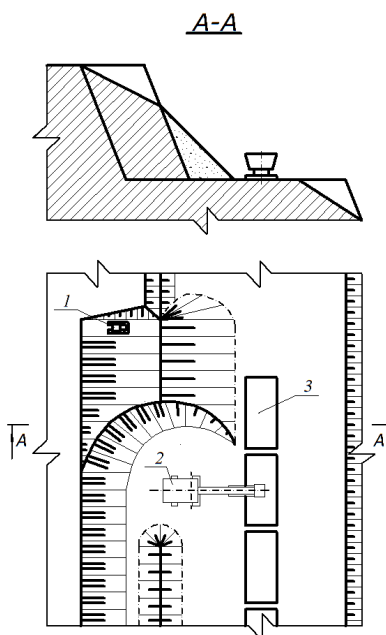


Рис. 4. Простая селективная выемка наклонного пласта с бульдозерной подвалкой и временным складированием породы в штабель: 1 – бульдозер; 2 – мехлопата; 3 – железнодорожный вагон

Простая селективная разработка осуществляется узкими заходками, нормальными заходками, выборочной погрузкой, ступенчатым уступом.

При автомобильном транспорте простая селективная выемка осуществляется без процесса отсыпки навала, поскольку объем полезного ископаемого или вскрыши, отгружаемой в один технологический автомобиль, позволяет отгрузить его из забоя без отдельной отсыпки в навал другого типа пород. В этом случае сначала отрабатывается по фронту вдоль уступа узкая заходка с одним типом горной породы, а затем при необходимости экскаватор возвращается и отрабатывает так же узкой заходкой другой тип пород.

При простой селективной выемке с погрузкой в автотранспорт производительность выемочного оборудования снижается ориентировочно на 10% [5-7]. При погрузке в железнодорожный транспорт снижение более существенно и зависит от положения слоев, а также технологии погрузки.

Более редко применяемой на железорудных карьерах является сложная селективная выемка, при которой не удается отработать забой простыми (однородными) заходками. Если высота забоя не превышает высоту черпания экскаватора, то селективная выемка слоев может иметь разные варианты последовательности отработки забоя, в зависимости от параметров слоев и физико-механических свойств пород. На рис. 5 приведены возможные варианты последовательности отработки слоев.

В случае селективной отработки высоких забоев применяют схемы с управляемым оборудованием. Отработка забоя начинается, как правило, с верхних слоев.

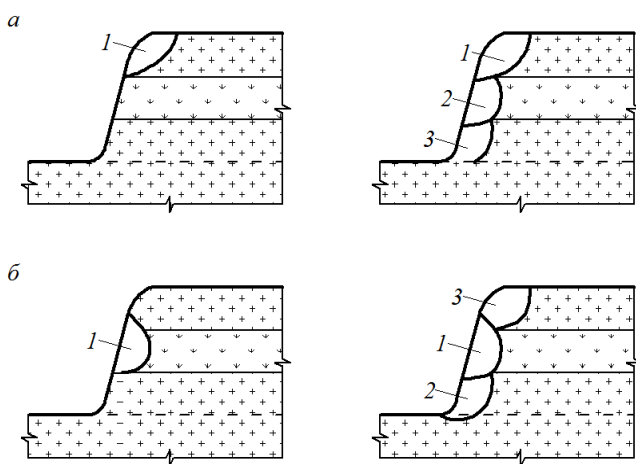


Рис. 5. Варианты отработки слоев при сложной селективной выемке: а, б – варианты отработки слоев; 1, 2, 3 – последовательность отработки слоев

На рис. 6 показана схема отработки забоя при раздельной выемке полезного ископаемого трех сортов: первого, второго и третьего.

Раздельная выемка выполняется с регулированием толщины стружки и степени наполнения ковша. Отработка забоя начинается, как правило, с верхних слоев.

Впервые сложная селективная экскавация была применена на Магнитогорском руднике. При сложной селективной экскавации приемы внутрizaбойной сортировки рудной массы сочетаются с попутной отгруз-

кой требуемых руд. Внутрizaбойная экскаваторная сортировка состоит из подготовки и собственно сортировки. Подготовка к сортировке включает подготовку забоя, а также выбор места для размещения отсортированной массы и негабаритов. При подготовке забоя удаляются нависи, козырьки, заколы, чем предупреждается самопроизвольное обрушение и смешивание отдельных разнородных участков.

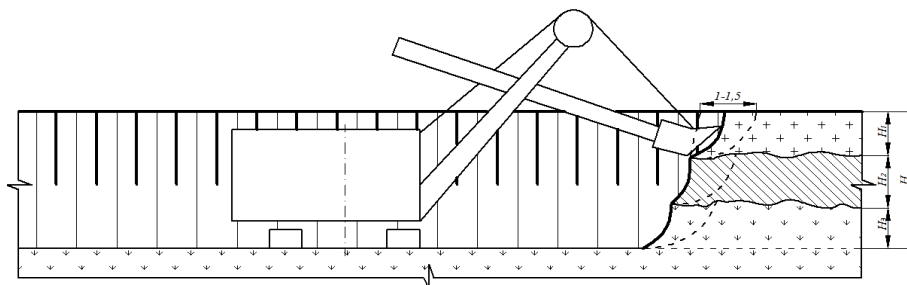


Рис. 6. Схема отработки забоя при раздельной выемке: 1-1,5 – толщина стружки; H – высота уступа; H₁, H₂, H₃ – толщина слоев горных пород

Сама сортировка заключается в обособленной выемке и погрузке разнородной массы или предварительном внутрizaбойном смешивании разных по качеству руд в штабели перед погрузкой. Сортировка может осуществляться методами управляемого обрушения или раздельной выемкой.

Управляемое обрушение осуществляется подработкой нижней части забоя в порядке, зависящем от расположения полезного ископаемого в забое или развале.

Величина количественных и качественных потерь полезного ископаемого при отработке сложных забоев зависит от вместимости ковша используемого экскаватора. Так, для условий Центрального Кузбасса с увеличением вместимости ковша экскаватора с 4-5 до 8 м³ потери увеличиваются на 14-15% при разработке маломощных пластов и на 11-12% на пластах средней мощности. Поэтому на добычных работах, особенно при отработке сложноструктурных залежей, принимают экскаваторы с меньшей вместимостью ковша, чем на вскрышных работах.

Механические лопаты не обеспечивают качественной селективной выемки в сложных условиях. Большие возможности в этих условиях имеют прямые и обратные гидравлические лопаты, которые благодаря поворотности ковша и другой траектории его движения могут отрабатывать забои различной конфигурации. На ряде зарубежных карьеров находят применение машины для тонкослойной выемки.

Наиболее легко селективная разработка сложных забоев достигается при использовании автотранспорта как за счет погрузки разнокачественной горной массы в разные автосамосвалы непосредственно из забоя без промежуточного складирования, так и благодаря удобству изменения параметров экскаваторных забоев и заходов. При железнодорожном транспорте раздельная добыча полезного ископаемого часто связана с дополнительным штабелированием горной массы по типам и сортам в призабойном про-

странстве, увеличением времени погрузки составов за счет необходимости набора большого объема однородной массы, расформированием составов или сокращением их полезной массы.

При селективной выемке горной массы производительность выемочно-погрузочного оборудования зависит от структуры забоя и квалификации машиниста. Чем сложнее забой, тем больше времени требуется на подготовку горной массы к отгрузке. Затраты времени вызываются дополнительными подъездами и отъездами оборудования, зачисткой забоя, обособленной выемкой и погрузкой различных типов и сортов полезного ископаемого, временным складированием их в забое.

По данным [8], это время составляет на рудных карьерах 22-67% от времени погрузки. По наблюдениям на карьере Джанатас время погрузки автосамосвала при селективной выемке увеличивается на 28-33%, а сменная производительность экскаватора снижается на 28-30%. Производительность экскаватора при селективной выемке во многом зависит от организации работ в забое, здесь желательно максимально совмещать подготовку забоя со временем отсутствия транспорта и обмена составов. В среднем производительность экскаваторов снижается при простой селективной выемке на 10-25%, а при сложной – на 30-35% и более.

Широкий круг вариантов расположения контактов залежи полезного ископаемого обуславливает необходимость выбора соответствующей схемы простой или сложной селективной выемки со своими особыми приемами выемочно-погрузочных и сортировочных работ. В рамках проводимого исследования разработаны методы определения границ валовой и селективной выемки полезного ископаемого при разных условиях расположения контактов залежи, определена возможность стабилизации качества полезного ископаемого в различных схемах выемочно-погрузочных и сортировочных работ, влияние селективной выемки на производительность выемочного оборудования и стоимостные показатели выемочно-погрузочных работ.

В рамках предстоящих исследований планируется дать оценку эффективности известных технологических схем выемочно-погрузочных работ в сложных забоях по критериям стабилизации качества полезного ископаемого, технико-экономическим показателям, исследовать зависимость показателей схем от исходных условий их применения с целью определения областей их эффективного использования. Результаты исследований позволят на следующем этапе с помощью информационных технологий обеспечить оперативный поиск эффективных технологических решений по стабилизации качества полезного ископаемого, получить оптимальные параметры этих решений.

Список литературы

1. Технология открытой разработки месторождений полезных ископаемых. Ч. 1 / М.Г. Новожилов, Ф.И. Кучерявый, В.С. Хохряков В.С. и др. М.: Недра, 1971. 510 с.
2. Справочник открытых горных работ / К.Н. Трубецкой, М.Г. Трубецкой, К.Е. Винницкий, Н.В. Мельников и др. М.: Горное дело, 1994. 590 с.
3. Разработка ИС поддержки принятия решений при формировании эффективных технологических схем стабилизации качества полезного ископаемого по программе 055 «Научная и/или научно-техническая деятельность»: отчет о НИР / РИИ. № ГР 0112РК02423. Рудный, 2012. 113 с.
4. Ильин С.А., Коваленко В.С., Манкевич В.В. Ресурсосбережение при открытых горных работах. М.: МГИ, 1995. 149 с.
5. Цай Л.А. Современные способы ведения взрывных работ при проведении горных выработок // Горный журнал Казахстана. 2007. №7. С. 9-11.
6. Хохряков В.С. Проектирование карьеров. М.: Недра, 1991. 392 с.
7. Фионин Е.А. Определение области селективной выемки при отработке контактов маломощных залежей // Сборник докладов седьмой международной научной конференции «Топорковские чтения». Вып. 7. Т. 2. Рудный: РИИ, 2006. С. 130-137.
8. Грачев Ф.Г. Теория и практика управления качеством минерального сырья. М.: Недра, 1985. 215 с.

Сведения об авторах

Зарубин Михаил Юрьевич – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой автоматизации и информационных систем Рудненского индустриального института, респ. Казахстан. Тел.: 8 (71431) 5-04-01-103. E-mail: zarubin_mu@mail.ru.

Фионин Евгений Александрович – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры металлургии и горного дела Рудненского индустриального института, респ. Казахстан. Тел.: 8 (71431) 5-04-01-132. E-mail: fioninea@mail.ru.

Данилец Екатерина Валерьевна – магистр, ст. преподаватель кафедры автоматизации и информационных систем Рудненского индустриального института, респ. Казахстан. Телефон: 8 (71431) 5-04-01-103. E-mail: danilets_kate@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ANALYSIS OF THE IMPACT OF ROCK MASS EXCAVATION TECHNOLOGICAL SCHEMES ON QUALITY INDEXES IN MINERAL DEPOSIT OPEN MINING

Zarubin Mikhail Yuryevich – Ph.D. (Eng.), associate professor, Head of Automation and Information Systems department, Rudny Industrial Institute, Kazakhstan. Phone: 8 (71431) 5-04-01-103. E-mail: zarubin_mu@mail.ru.

Fionin Evgeny Aleksandrovich – Ph.D. (Eng.), assistant professor, Metallurgy and Mining department, Rudny Industrial Institute, Kazakhstan. Phone: 8 (71431) 5-04-01-132. E-mail: fioninea@mail.ru

Danilets Ekaterina Valeryevna – M.Sc., assistant professor, Automation and Information Systems department, Rudny Industrial Institute, Kazakhstan. Phone: 8 (71431) 5-04-01-103. E-mail: danilets_kate@mail.ru.

Abstract. Questions relevant to the mining industry concerning the impact of rock mass excavation engineering schemes on quality indexes in mineral deposit open mining have been considered. Depending on the face type, simple and selective extraction engineering schemes have been highlighted. The impact of the schemes of gross, simple and complex selective rock mass mining applied by power shovels on the parameters of quality stabilization of the mineral and costs has been considered.

Keywords: minerals, excavating and loading, simple gross mining, simple selective mining, complex selective mining.

References

1. Novozhilov M.G., Kucheryavy F.I., Khokhryakov V.S. *The technology of mineral open-cast mining*. Part 1. Moscow: Subsoil, 1971. 510 p.
2. Trubetskoy K.N., Trubetskoy M.G., Vinnitsky K.E., Melnikov N.V. *Directory of open mining operations*. Moscow: Mining, 1994. 590 p.
3. Report on the research project on the "Development of IC decision support in the formation of effective technological schemes stabilize the quality of the mineral" by the Program 055 «Scientific and / or scientific and technical activities». No. of state registration. 0112RK02423. Rudny, 2012, 113 p.
4. Ilyin S.A., Kovalenko V.S., Mankevich V.V. *Resource-saving at open mining operations*. Moscow: MGI, 1995, 149 p.
5. Cai L.A. Modern ways of conducting explosive works when carrying out excavations. *The Mountain magazine of Kazakhstan*. 2007, no. 7, pp. 9-11.
6. Hokyryakov V.S. *Design of pits*. Moscow: Subsoil, 1991, 392 p.
7. Fionin E.A. Definition of area of selective dredging at working off of contacts of low-power deposits. *The Collection of reports of the seventh international scientific conference «Toporkovsky Readings»*. Release. 7, vol. 2. Rudny, RII, 2006, pp. 130-137.
8. Grachev F.G. Theory and practice of quality management of mineral raw materials. Moscow: Subsoil, 1985. 215 p.

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ

УДК 622.753: 622.648.24

Мельников И.Т., Пыталев И.А., Мельников И.И., Шевцов Н.С.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОТРАНСПОРТА ПОЛИДИСПЕРСНЫХ И ПОЛИМИНЕРАЛЬНЫХ ОТХОДОВ ОБОГАТИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация. При гидротранспорте полидисперсных и полиминеральных отходов обогатительного производства в переходной области в интервале частиц диаметром $0,15 \text{ мм} < d_{cp} < 1,5 \text{ мм}$, характерной для транспортирования хвостов горнодобывающих предприятий чёрной промышленности, наличие фракций менее $0,15 \text{ мм}$ приводит к формированию «тяжёлой» несущей среды с плотностью более единицы. Это приводит к росту архимедовой силы на более крупные фракции и обуславливает снижение гидравлического уклона и удельного расхода электроэнергии.

Ключевые слова: отходы обогатительного производства, полидисперсные и полиминеральные хвосты, гидротранспорт, «тяжёлая» несущая среда, гидравлический уклон, удельный расход электроэнергии.

В процессе гидротранспорта отходов обогатительного производства традиционно в качестве несущей жидкости используется вода. В последние годы обсуждается вопрос о выборе новых видов носителей, что связано с дефицитом воды в районах добычи минерального сырья и необходимостью её последующей очистки. Для устранения этих недостатков предлагаются различные решения, например использовать в качестве носителя природные воды с высоким содержанием солей, непригодные для использования в быту (морскую воду, засоленные грунтовые воды и т.п.), предварительно повысив в них концентрацию солей с таким расчётом, чтобы носитель имел плотность до $1,2 \text{ т/м}^3$. Благодаря тому, что разность между плотностью транспортируемых частиц и несущей среды будет меньше, дифференциация частиц будет затруднена. В Австралии разработана технология транспортировки угля с водой, маслом, небольшим количеством присадок и предварительным измельчением транспортируемого материала [1].

Наличие в хвостах фракции менее $0,15 \text{ мм}$ при плотности $3,5\text{--}4,5 \text{ т/м}^3$ и $0,25\text{--}0,5 \text{ мм}$ при плотности $2,8\text{--}3,4 \text{ т/м}^3$ позволит при перемешивании с водой образовывать несущую среду с плотностью большей, чем плотность исходной воды. Естественным образом формируется так называемая «тяжёлая» несущая среда. Что обеспечивает снижение доли энергии потока, затрачиваемой на взвешивание крупных частиц в движущемся потоке несущей среды вследствие увеличения архимедовой силы. В этом случае возникает перераспределение энергии в напорном трубопроводе на перемещение твёрдой фазы. Таким образом, самопроизвольное взвешивание мелких частиц, на которое практически не затрачивается энергия, обеспечивает естественный процесс взвешивания крупных частиц в более плотной среде при меньшей затрате энергии [2].

В зависимости от крупности транспортируемого материала согласно исследованиям многочисленных

авторов существует три области течения гидросмеси при напорном гидротранспорте [3-7].

1. Ламинарная область в диапазоне крупности $0,010 \text{ мм} < d_{cp} < 0,15 \text{ мм}$ характерна для транспортирования хвостов горнодобывающих предприятий цветной промышленности, содержание частиц в которых менее 40 мкр составляет $70\text{--}90\%$. Транспортирование гидросмесей с мелкими частицами, образующими гомогенные смеси, могут происходить при небольших числах Рейнольдса, так как силы тяжести в этом случае компенсируются силами, обусловленными вязкостью среды. Для каждого вида хвостов, являющихся полидисперсными и полиминеральными техногенными породами, существуют вполне конкретные граничные значения концентрации твёрдой фазы и вязкости гидросмеси, когда их течение подчиняется законам Бингамовской среды [8]. Реализация транспортирования неньютоновских жидкостей возможно при организации надёжной технологии сгущения гидросмесей и применения высоконапорных объёмных гидромашин. Реализация гидротранспорта высокоплотных пульп обеспечивает снижение энергоёмкости и материалоёмкости.

2. Переходная область в интервале частиц диаметром $0,15 \text{ мм} < d_{cp} < 1,5 \text{ мм}$ характерна для транспортирования хвостов горнодобывающих предприятий чёрной промышленности. Традиционно в качестве несущей жидкости используется вода.

3. Турбулентная область с геометрической крупностью зерен $1,5 \text{ мм} < d_{cp} < D \text{ мм}$ характерна при разработке песчано-гравийно-валунчатых грунтов средствами гидромеханизации, а также гидротранспорте угля и руд черных и цветных металлов.

Детальный анализ существующих расчетных формул позволяет большинство из них представить общим выражением в функции диаметра трубопровода D и скорости движения пульпы V [9]:

$$J_n = J_0 + \Delta J = A' \frac{V}{D} + B' \frac{D}{V}, \quad (1)$$

где J_0 – гидравлический уклон пульпопровода при движении чистой воды;

ΔJ – дополнительные потери напора, обусловленные наличием твердых частиц в потоке жидкости, м/м; A' и B' – переменные коэффициенты пропорциональности, которые являются функциями $A' = f(\lambda)$, $B' = f(\lambda, d_{cp}, \delta_T, \delta_n)$.

Заменим в формуле (1) скорость движения пульпы выражением $V = Q \cdot (900 \cdot \pi \cdot D^2)^{-1}$. После преобразования получим формулу гидравлического уклона при $\lambda = \text{const}$.

$$J_n = J_0 + \Delta J = A \cdot \lambda \cdot \frac{Q^2}{D^5} + B \cdot \lambda \cdot \frac{D^{2,5}}{Q}, \quad (2)$$

где J_0 и J_n – гидравлический уклон на чистой воде и пульпе, м/м; $A = (164,52 \cdot 10^6)^{-1} \text{ м}^{-1} \cdot \text{ч}^2$; λ – коэффициент сопротивления пульпопровода; Q – расход транспортируемой пульпы по трубопроводу, м³/ч; D – стандартный диаметр пульповода, м; B – параметр, не зависящий от скорости (расхода) и диаметра трубопровода и являющийся функцией различных характеристик гидросмеси, а также ее жидкой и твердой составляющих, м^{0,5} · ч⁻¹.

$$B = 2826 \cdot K \cdot (\delta_n - \gamma_{HC}) \times d_{cp}^x \cdot (\delta_T - \gamma_{HC})^y; \quad (3)$$

для ламинарной области в диапазоне крупности $0,010 \text{ мм} < d_{cp} < 0,15 \text{ мм}$

$$K = 1045 \text{ м}^{-1,75} \cdot \text{ч}^{-1}; \quad x = 2,25; \quad y = 1,25;$$

для переходной области в интервале частиц диаметром $0,15 \text{ мм} < d_{cp} < 1,5 \text{ мм}$

$$K = 91,2 \text{ м}^{-0,25} \cdot \text{ч}^{-1}; \quad x = 0,75; \quad y = 1,25;$$

для турбулентной области с геометрической крупностью зерен $1,5 \text{ мм} < d_{cp} < D \text{ мм}$

$$K = 207 \text{ м}^{0,5} \cdot \text{ч}^{-1}; \quad x = 0; \quad y = 0,5;$$

$$\delta_n = \frac{\gamma_n}{\gamma_{HC}} \quad \text{и} \quad \delta_T = \frac{\gamma_T}{\gamma_{HC}} \quad - \text{относительная}$$

плотность пульпы и твердых частиц, когда несущей средой является суспензия – смесь воды и мелких фракций хвостов, которые в течение длительного времени не формируют осадка в пульпопроводе (безразмерные), где γ_0, γ_{HC} – плотность воды и несущей среды, т/м³;

d_{cp} – средневзвешенная геометрическая крупность транспортируемых частиц (при установлении размерности подставляется в метрах, а при расчетах следует подставлять в мм).

Плотность транспортируемой пульпы δ_n и несущей среды γ_{HC} связана с весовой консистенцией R следующими зависимостями:

$$\delta_n = \frac{1 + R}{R + \delta^{-1}}; \quad \gamma_{HC} = \frac{R + \psi}{R + \frac{\psi}{\gamma_T}}, \quad (4)$$

где ψ – доля частиц крупностью менее 0,15 мм.

При наличии в хвостах фракций менее 0,15 мм, а в отдельных случаях до 0,25–0,5 мм, в смеси с водой образуют несущую среду с плотностью большей, чем вмещающая вода. Графическая зависимость плотности несущей среды от содержания мелких фракций ψ от 0 до 70%, изменения плотности твердых частиц в диапазоне 2,0; 2,5–4,5 т/м³ для двух значений весовой консистенции представлена на рис. 1. Анализ полученных данных показывает, что плотность несущей среды зависит от суммарной весовой консистенции пульпы, плотности частиц и может изменяться для принятых условий расчета от 1,005 до 1,09 т/м³.

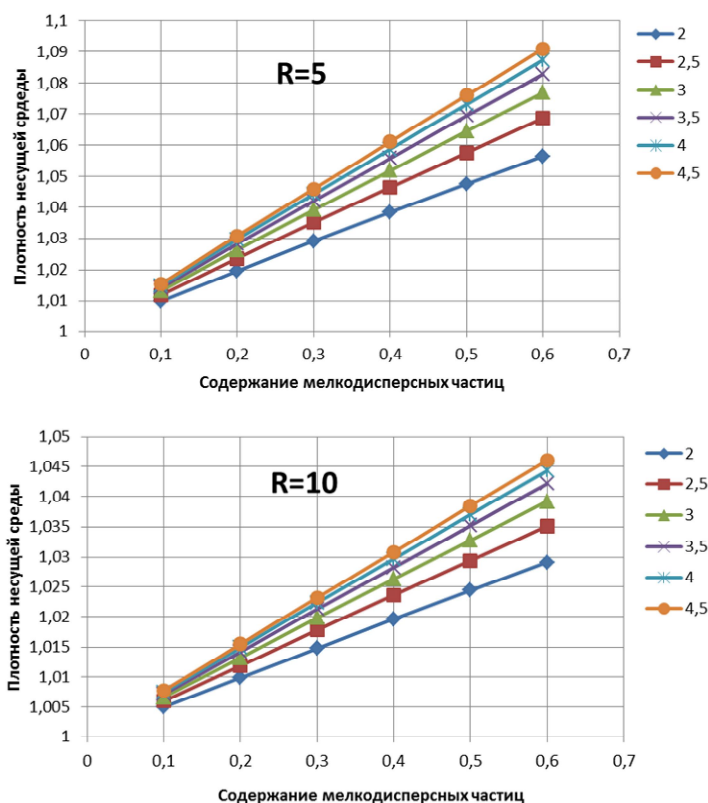


Рис. 1. Зависимость плотности несущей среды от содержания мелкодисперсных частиц и их плотности $\gamma_T = 2,0\text{--}4,5 \text{ т/м}^3$ для весовой консистенции Ж:Т $R = 5$ и $R = 10$

Используя функциональную зависимость $\lambda_{oo} = f(\text{Re})$ проф. Конакова П.К. [8] и учитывая замечания проф. Дюранда [9], нами получена зависимость коэффициента сопротивления пульповодов с установившейся шероховатостью [10]:

$$\lambda = 0,308 \cdot \left[\lg(m \cdot Q_n \cdot D^{-1}) \right]^{-2}, \quad (5)$$

где $m=35,386$; D – внутренний диаметр пульпопровода, м; Q_n – расход пульпы, м³/ч.

Из анализа формулы (5) следует, что коэффициент сопротивления пульпопровода λ уменьшается с увеличением количества транспортируемой по трубопроводу пульпы при $D = const$ и с увеличением диаметра пульпопровода при $Q = const$.

После подстановки уравнения (5) в зависимость (2) получим уравнение гидравлического уклона пульпопровода при переменном значении $\lambda \neq const$:

$$J_n = 0,308 \times \left[\lg(m \cdot Q_n^2 \cdot D^{-5} + B \cdot D^{2,5} \cdot Q_n^{-1}) \right]. \quad (6)$$

Продифференцируем функциональную зависимость (4) по одной из двух переменных. Решая уравнения $\frac{\partial J_n}{\partial Q_n} = 0$ при

$D=const$ и $\frac{\partial J_n}{\partial D} = 0$ при $Q=const$, получим два уравнения [11]:

$$A \cdot Q_n^3 \cdot \left[2 \cdot \lg(m \cdot Q_n \cdot D^{-1}) - 0,8686 \right] - B \cdot D^{2,5} \cdot \left[\lg(m \cdot Q_n \cdot D^{-1}) + 0,8686 \right] = 0; \quad (7)$$

$$A \cdot Q_n^3 \cdot \left[0,8686 - 5 \cdot \lg(m \cdot Q_n \cdot D^{-1}) \right] + B \cdot D^{7,5} \cdot \left[2,5 \cdot \lg(m \cdot Q_n \cdot D^{-1}) + 0,8686 \right] = 0. \quad (8)$$

Оба уравнения трансцендентные, для их решения можно использовать математические методы оптимизации с помощью ЭВМ и производить поиск корней $Q_{нкр}$ по зависимости (5) и $D_{кр}$ по зависимости (6). Подставляя найденные корни в уравнения (3),(4), можно определить критический гидравлический уклон и коэффициент сопротивления пульпопровода.

Расчет удельных затрат энергии (на доставку 1 т хвостов гидротранспортом на расстояние 1 км) производили по следующему выражению [12], кВт·ч/т·км:

$$q_0 = 500 \cdot \frac{J_{нкр}}{P_{зкр}}, \quad (9)$$

где $P_{зкр} = 100 \cdot \frac{G_{Ткр}}{G_{нкр}}$ – массовая консистенция пульпы к массе (весу) пульпы.

В работе [13] автором предлагается для более точных расчетов производить детальное исследование по крупности и плотности твердых материалов, перемещаемых гидротранспортом. При этом рекомендует-

ся в каждой фракции определять долю частиц с различной плотностью (см. таблицу).

Гранулометрическая характеристика техногенных россыпей ЦГОКа

Класс крупности, мм		Доля фракций с плотностью, т/м³					Массовая доля, %	Средневзвешенная плотность фракций, т/м³
Более	Менее	5,000	4,413	3,825	3,355	2,650		
0,000	0,044	9,24	0,11	0,07	0,09	8,53	18,04	3,873
0,044	0,070	3,69	0,66	1,10	0,58	4,54	10,66	3,735
0,070	0,160	1,97	0,99	4,23	3,43	6,79	17,40	3,443
Среднеарифметическое класса +0,160							46,10	3,684
0,160	0,250	0,79	0,55	5,59	3,93	8,03	18,90	3,292
0,250	0,500	0,17	0,06	6,67	7,20	4,70	18,80	3,364
0,500	1,000	0,00	0,00	4,20	6,26	3,93	14,40	3,297
1,000	5,000	0,00	0,00	0,55	0,81	0,45	1,80	3,343
Сумма, %		15,85	2,37	22,42	22,30	37,07	100,0	3,478
Среднеарифметическое всей пробы								

Согласно приведенным данным следует, что техногенные породы являются не только полидисперсными, но и полиминеральными, так как их плотность в пределах одной фракции изменяется от 5,0 до 2,65 т/м³. Исследования хвостов обогатительных фабрик Соколовско-Сарбайского, Качканарского и Лисаковского ГОКов, ГОПа ОАО «ММК» также подтверждают их полидисперсность и полиминеральность. Для рассмотренного случая (см. таблицу) плотности несущей среды, рассчитанная по формуле (4), составляет $\gamma_{нс} = 1,064$ т/м³ при $R=5$ $\gamma_{нс} = 1,032$ т/м³ при $R=10$ для плотности мелких частиц $\gamma_T = 3,684$ т/м³ и их долевым содержанием $\psi=0,461$. Интегральные показатели транспортируемых отходов обогащения следующие: средневзвешенный диаметр общей пробы $d_{ср}=0,503$ мм и средневзвешенная плотность $\gamma_T = 3,324$ т/м³. Следует отметить, что при расчете параметров гидротранспортной системы принимались значения плотности и средневзвешенной крупности для фракций класса более 0,16 мм. Результаты теоретических расчетов по предлагаемой выше методике для отходов обогащения ЦГОКа по оценке гидравлического уклона и удельного расхода электроэнергии с учетом формирования несущей среды с плотностью выше единицы и увеличения архимедовой силы представлены на рис. 2.

Анализ полученных данных позволяет сделать выводы о том, что формирование несущей среды за счет образования устойчивой взвеси их частиц крупностью менее 0,16 мм приводит к снижению гидравлического уклона и удельного расхода электроэнергии на гидротранспортирование.

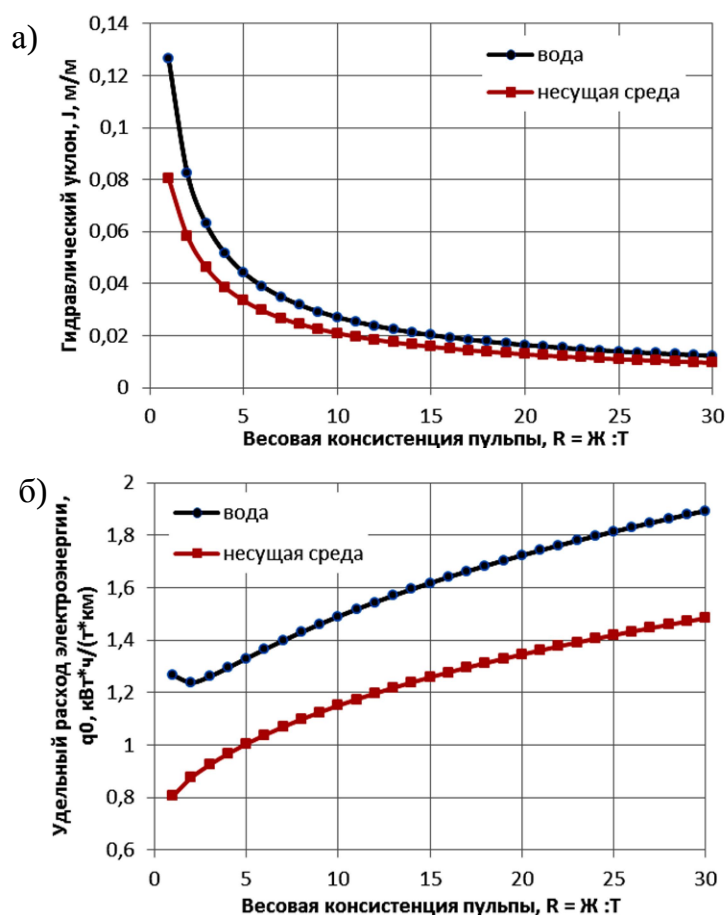


Рис. 2. Зависимости гидравлического уклона J_h (а) и удельного расхода электроэнергии q_0 (б) от весовой консистенции пульпы R (содержания пылеватых частиц $\psi = 0,461$ с плотностью $\gamma_T = 3,684$ т/м³ и средневзвешенной крупности транспортируемого материала $d_{cp} = 0,503$ мм и средневзвешенная плотность $\gamma_T = 3,324$ т/м³)

Выводы

1. При гидротранспорте полидисперсных и полиминеральных отходов обогатительного производства необходимо обращать внимание на содержание мелких фракций менее 0,15 мм. При их содержании более 20-30% от общего веса естественным путём формируется «тяжёлая» несущая среда с плотностью больше единицы.

Сведения об авторах

Мельников Иван Тимофеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры открытой разработки месторождений полезных ископаемых ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел: 8(3519)298466. E-mail: werty71@mail.ru.

Пыталев Иван Алексеевич – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры открытой разработки месторождений полезных ископаемых ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: vehicle@list.ru.

Мельников Илья Иванович – канд. экон. наук, кафедра «Мировая экономика» Московского государственного университета управления, г. Москва. E-mail: mlnkv@bk.ru.

Шевцов Николай Сергеевич – аспирант кафедры открытой разработки месторождений полезных ископаемых ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел: 8(3519)298466. E-mail: shevcov.nikolay@gmail.com.

2. Учет естественного формирования «тяжёлой» несущей среды за счёт наличия мелких фракций в техногенных отходах обогатительного производства приводит к снижению гидравлического уклона и удельного расхода электроэнергии, что подтверждается результатами практики.
3. Перспективным направлением совершенствования гидротранспортных систем горно-обогатительных комбинатов является проведения исследований применения искусственно создаваемой несущей среды с плотностью до 1,2 т/м³

Список литературы

1. Докукин В.П. Формирование системы трубопроводного гидротранспорта горных предприятий на основе метода динамической оптимизации её параметров: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.06. Санкт-Петербург, 2005. 280 с.
2. Каненков В.В. Снижение энергоёмкости гидравлического транспортирования полидисперсных гидросмесей на предприятиях горной промышленности: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. Санкт-Петербург, 2006. 136 с.
3. Роер Г.Н. Устойчивые режимы и потери напора при напорном движении пульпы в пульпопроводах // Известия Академии Наук СССР. ОТН. 1939. №8.
4. Юфин А.П. Движение неоднородной жидкости по горизонтальным стальным незаильным трубам // Известия Академии Наук СССР. ОТН. 1949. №8.
5. Великанов М.А. Обоснование гравитационной теории движения наносов // Метеорология и гидрология. 1938. №9-10.
6. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. Т. 2. Наносы и русло. М.: Гостехиздат, 1955. 316 с.
7. Маккавеев В.М. К теории турбулентного режима и взвешивания наносов // Известия Государственного гидрологического института (ГГИ). 1931. №32. С. 5-26.
8. Александров В.И., Кулешов А.А. Снижение удельной энергоёмкости гидротранспортных комплексов // Горные машины и автоматика. 2004. №6. С. 16-18.
9. Конаков П.К. Новая формула для коэффициента сопротивления для гладких труб // ДАН СССР. 1946. Т. 10. С. 70-77.
10. Durand R., Condolios E. Donnes techniques sur le refoulement hydraulique des materiaux solides tn Conditie. Congres du centenaire de Societe de l'industrie minerale, Paris, Juin, 22F, 1955.
11. Мельников И.Т., Мельников Т.И., Горбатов А.И. Критический гидравлический уклон пульпопровода. // Изв. ВУЗов. Горный журнал. 1997. №7-8. С. 143-146.
12. Снижение энергоёмкости гидротранспорта хвостов обогатительного производства железорудных горно-обогатительных комбинатов / Мельников И.Т., Пыталев И.А., Корнилов С.Н., Кутлубаев И.М., Васильев К.П., Мельников И.И., Шевцов Н.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. №2. С. 15-19.
13. Семенов Е.В. Методика расчёта параметров внутрифабричных систем гидротранспорта // Горная электромеханика. 2008. Вып. 15 (131). С. 174-179.

THEORETICAL RESEARCH OF HYDROTRANSPORT OF POLYDISPERSE AND POLYMINERAL TAILS OF MINERAL PROCESSING INDUSTRY

Melnikov Ivan Timofeyevich – Ph.D. (Eng.), associate professor, Open-Pit Mining of Mineral Deposits department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Phone: (3519)298556. E-mail: werty71@mail.ru.

Pytalev Ivan Alekseevich – Ph.D. (Eng.), assistant professor, Open-Pit Mining of Mineral Deposits department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. E-mail: vehicle@list.ru.

Melnikov Ilya Ivanovich – Ph.D. (Economics), assistant professor, World Economy department, Moscow State University of Management, Moscow. E-mail: mlnkv@bk.ru.

Shevtsov Nikolay Sergeevich – a postgraduate student, Open-Pit Mining of Mineral Deposits department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Phone: (3519) 298 466. E-mail: shevtsov.nikolay@gmail.com.

Abstract. During hydro transportation of polydisperse and poly-mineral tails of mineral processing industry within the transition region in the 0.15 mm < d_{cp} < 1.5 mm particles diameter range, which are typical to transport tailings of ferrous industry mining, fraction existence less than 0.15 mm leads to the formation of «heavy» carrying medium with a density greater than unity. This results in buoyancy force increasing to the larger fractions and causes of hydraulic gradient and specific energy consumption reducing.

Keywords: mineral processing industry tails, polydisperse and polymineral tailings, hydrotransport, «heavy» carrying medium, hydraulic gradient, energy discharge intensity.

References

1. Dokukin V.P. *Formirovanie sistemy truboprovodnogo gidrotransporta gornyykh predpriyatiy na osnove metoda dinamicheskoy optimizatsii eyo parametrov: dis. ... d-ra tekhn. nauk.* [Formation of the pipeline system of mining enterprises on the basis of dynamic optimization of parameters. Dis.]. St. Petersburg, 2005, 280 p.
2. Kanenkov V.V. *Snizhenie energoyomkosti gidravlicheskogo transportirovaniya polidispersnykh gidrosmelej na predpriyatiyakh gornoj promyshlennosti: dis. ... kand. tekhn. nauk.* [Reducing of energy consumption of hydraulic transportation of polydisperse slurries in mining industry enterprises. Dis.]. St. Petersburg, 2006, 136 p.
3. Royer G. Stable regimes and the head loss in the pressure in the movement of the pulp slurry pipeline. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. OTN.* [Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR, OTN]. 1939, no. 8.
4. Yufin A.P. Inhomogeneous fluid movement on horizontal steel pipes. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. OTN.* [Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR, OTN]. 1949, no. 8.
5. Velikanov M.A. Justification of the gravitational theory of motion of nano-owls. *Meteorologiya i gidrologiya.* [Meteorology and Hydrology]. 1938, no. 9-10.
6. Velikanov M.A. *Dinamika ruslovykh potokov.* [Dynamics of channel flow]. Deals and track. Moscow, 1955, vol. 2, 316 p.
7. Maccabees V.M. The theory of turbulent and weighing sediment. *Izvestiya Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta (GGI).* [Proceedings of the State Hydrological Institute (SHI)]. 1931, no. 32, pp. 5-26.
8. Alexandrov V.I., Kuleshov A.A. *Reducing energy intensity of hydro facilities. Gornye mashiny i avtomatika.* [Mining Machinery and Automation]. 2004, no. 6, pp. 16-18.
9. Konakov P.K. The new formula for the drag coefficient for smooth pipes. *AS USSR*, 1946, vol. 10, pp. 70-77.
10. Durand R., Condolios E. *Donnes techniques sur le refoulement hydraulique des materiaux solides tn Conditte.* Congres du centenaire de Sosite de l'industrie minerale. Paris, Juin, 22F, 1955.
11. Melnikov I.T., Melnikov T.I., Gorbato A.I. Critical hydraulic gradient slurry pipeline. *Izv. VUZov. Gornyy zhurnal.* [Mining Journal Math. Universities]. 1997, № 7-8, pp. 143 - 146.
12. Melnikov I.T., Pytalev I.A., Kornilov S.N., Kutlubaev I.M., Vasilyev K.P., Melnikov I.I., Shevtsov N.S. Energy consumption reducing of hydro-transport iron ore tailings processing industry Mining and processing plants. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova.* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012, no. 2, pp. 15-19.
13. Semenenko E.V. Method of calculating the parameters of hydraulic transport systems intra fabric. *Gornaya elektromekhanika.* [Mining Electrical Engineering]. 2008, vol. 15 (131), pp. 174-179.

УДК 622.817

Медяник Н.Л., Варламова И.А., Калугина Н.Л.

ОСОБЕННОСТИ ПОДБОРА ОРГАНИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ-КОМПЛЕКСООБРАЗОВАТЕЛЕЙ КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ КАТИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ РАСТВОРОВ

Аннотация. Раздельное количественное извлечение цветных металлов из растворов возможно при использовании эффективных органических реагентов, выбор которых осуществлен квантово-химическим методом расчета параметров реакционной способности как извлекаемых компонентов, так и извлекающих реагентов.

Ключевые слова: органические реагенты, комплексобразование, цветные металлы, растворы, квантово-химический метод, параметры реакционной способности.

При добыче и переработке руд на горно-обогатительных медно-цинковых предприятиях Уральского региона образуются значительные объемы техногенных вод, таких как подотвальные, карьерные и шахтные воды, характеризующиеся различным поликомпонентным составом тяжелых и цветных металлов с минерализацией от долей до сотен мг в

1 дм³ с приоритетным содержанием меди, цинка, марганца и железа. Эти воды являются одним из основных источников поступления металлов в поверхностные и подземные водоемы, оказывая сильное токсичное воздействие на экосистемы районов недропользования. Практически все предприятия медного комплекса для очистки техногенных вод в настоящее

время используют метод нейтрализации для выделения металлов в виде гидролитических осадков без их дальнейшего разделения и реутилизации. Применение других методов извлечения металлов (сорбция, гиперфильтрация, ультрафильтрация, экстракция, ионный обмен, эвапорация, кристаллизация, магнитная обработка, электродиализ, электрофлотокоррекция рН, электрокоагуляция и др.) ограничено, и наиболее перспективным, высокоэффективным и экономически обоснованным представляется флотационный способ переработки техногенных вод. Возможно применение различных вариантов данного метода – ионной, пневматической, напорной флотации и электрофлотации в зависимости от условий селективного выделения и концентрирования полезных компонентов из техногенных вод в дисперсную фазу.

Раздельное количественное извлечение наиболее ценных металлов из техногенных вод методом ионной флотации возможно только при использовании органических реагентов-собираателей, к которым предъявляются следующие требования: избирательность действия или возможность группового выделения и концентрирования металлов (в зависимости от технологической задачи); время флотации не более 10 мин; реутилизация пенного продукта (сублата) в используемый ингредиент; растворимость флотореагента в воде или в доступных малотоксичных растворителях (массовая доля реагента в растворе должна составлять 2% и более); низкая чувствительность к солевому фону; хорошие пенообразующие свойства или сочетаемость с доступными пенообразователями; незначительный унос флотореагента с водной фазой; минимальный расход на единицу извлечения металла; низкая токсичность; доступность и возможность регенерации.

Ассортимент применяемых органических реагентов для ионной флотации тяжелых металлов ограничен использованием ионогенных гетерополярных поверхностно-активных веществ, служащих для гидрофобизации поверхности и образования прочных связей с катионами металлов. Практическое значение имеют гександеканоат натрия, п-додецилбензолсульфонат калия, этилксантогенат калия, бутилксантогенат калия, амилксантогенат калия и диэтилдитиокарбамат натрия [1]. Создание технической базы перспективных реагентов нового поколения, селективно действующих, адаптированных к условиям ведения процесса и физико-химическому состоянию перерабатываемых растворов, неизбежно приведет к увеличению возможностей флотационных методов выделения и концентрирования ионов металлов, позволяющих более эффективно и с высокой скоростью проводить переработку техногенных вод различного состава. В этой связи целесообразно и перспективно основываться на принципе «структура – свойство/активность – свойство». Применительно к флотационным системам данный принцип можно сформулировать следующим образом: молекулярные структуры соединений реагентов содержат активные реакционные центры по отношению к извлекаемым компонентам (субстратам) – цинку и меди, структура и свойства которых усиливают избирательное действие применяемых реагентов и обеспе-

чивают получение прочных соединений «субстрат – реагент» во флотационных системах. Реализация принципа базируется на установлении зависимостей между структурой, квантово-химическими параметрами, физико-химическими свойствами и реакционной активностью извлекаемых компонентов (субстратов Zn^{2+} и Cu^{2+}) и извлекающих агентов (реагентов-собираателей). Комплекс параметров реакционной способности (ПРС) включает квантово-химические, физико-химические и структурные (формные и фрагментарные) параметры. Входящие в комплекс ПРС физико-химические параметры включают: для субстратов – рН извлечения металлов из водных растворов в сочетании с произведением растворимости (ПР) их осаждаемых форм, позволяющие определить эффективные условия извлечения субстратов из многокомпонентной матрицы технологического раствора; для реагентов-собираателей – относительные молекулярные массы M_r , температуру застывания, плотность, вязкость, K_1 – константу диссоциации, критические концентрации мицеллообразования – ККМ; для соединений «субстрат – реагент» – константу устойчивости образующегося сублата K_2 , оптимальное значение рН комплексобразования, энергию стабилизации катионов металлов полем лигандов по классификации Ирвинга – Вильямса [2].

Для субстратов и реагентов квантово-химическими параметрами являются энергии граничных молекулярных орбиталей E_{HOMO} – верхней занятой и E_{LUMO} – нижней свободной, значения абсолютной жесткости η , абсолютной мягкости S , химического потенциала χ , проекционные карты молекулярного электростатического потенциала (МЕР), значения глобальной I_E и локальной I_E^+ электрофильности субстратов, глобальной I_N и локальной I_N^- нуклеофильности реагентов-собираателей; для систем «субстрат – реагент» – E_{HOMO} и E_{LUMO} молекулярных орбиталей, значения η , S и χ , проекционные карты МЕР, количество водородных связей в молекулах, степень переноса заряда ΔN и энергии комплексобразования ΔE [3]. Структурные параметры включают: формные параметры для субстратов, позволяющие определять их тип по классификации Льюиса (жесткая, промежуточная или мягкая кислота) и эффективные извлекаемые формы; они определяются по величине значений физико-химических (рН и ПР) и квантово-химических параметров (E_{LUMO} , η , МЕР, I_E); фрагментные параметры для реагентов-собираателей, используемые с целью определения их типов как оснований Льюиса и ионизированных форм в зависимости от присутствующих в них функционально-активных групп (ФАГ), позволяющих избирательно действовать на субстраты; они также определяются по величине физико-химических (рН и рК) и квантово-химических параметров (E_{HOMO} , η , МЕР, I_N).

Установление зависимости между структурой, квантово-химическими параметрами, физико-химическими свойствами и реакционной способностью субстратов и извлекающих реагентов, анализ

ПРС как уже рекомендованных, так и новых перспективных реагентов для практики ионной флотации тяжелых и цветных металлов из техногенного вод позволили сформулировать требования к реагентам-собираателям для ионной флотации меди и цинка и определить оптимальные значения соответствующих параметров [2]:

1) наличие активных нуклеофильных центров в составе молекулы реагента (I_N больше или равно 1 эВ^{-1}), способных к эффективному взаимодействию с субстратом с образованием прочных сублатов – малорастворимых внутрикомплексных соединений MeL, для которых выполняются следующие условия: $PR(\text{MeL})$ меньше $PR(\text{Me}(\text{OH})_n)$, $K_2(\text{MeL})$ больше $K_2[\text{Me}(\text{H}_2\text{O})_6](\text{OH})_n$;

2) близкие значения $E_{\text{НОМО}}$ реагента и $E_{\text{ЛУМО}}$ субстрата при образовании системы «субстрат – реагент» преимущественно по орбитально-контролируемому механизму либо их существенное различие и, следовательно, осуществление «жестко-жесткого» взаимодействия между субстратом и реагентом преимущественно по зарядно-контролируемому механизму;

3) при раздельном селективном извлечении двух металлов возможность реагента реагировать с одним из них преимущественно по орбитально-контролируемому, а с другим – преимущественно по зарядно-контролируемому механизму;

4) высокая абсолютная жесткость реагента η (не менее 8 эВ);

5) величина химического потенциала реагента χ в интервале $4\text{--}5 \text{ эВ}$;

6) наличие в извлекаемых системах «субстрат – реагент» нескольких внутримолекулярных водородных связей (не менее трех), способствующих повышению их устойчивости;

7) степень переноса заряда ΔN образующихся систем «субстрат – реагент» должна быть не менее $0,6$.

Были проведены квантово-химические расчеты, в ходе которых установлено, что всем перечисленным требованиям удовлетворяют сложные эфиры терефталевой кислоты, в частности моноэтиленгликольтерефталат (MonoEtgl-tPht) и диэтиленгликольтерефталат (DiEtgl-tPht), значения ПРС которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Квантово-химические ПРС сложных эфиров терефталевой кислоты в свободном состоянии

Реагент	$E_{\text{НОМО}}$	$E_{\text{ЛУМО}}$	η	χ	I_N^-	$I_{N(\text{O})}^-$
	в электрон-вольтах					
MonoEtgl-tPht	– 10,538	1,201	11,739	4,669	1,076	O = (C) 0,319
						– O(H) 0,272
DiEtgl-tPht	– 10,621	1,256	11,877	4,683	1,083	O = (C) 0,327
						– O(H) 0,272

Рассчитанные ПРС субстратов, реагентов и продуктов их взаимодействия с субстратами позволили провести моделирование процессов образования возможных молекулярных систем «субстрат – реагент» с

участием цинка в кислой среде и меди в слабощелочной среде. Полученные значения квантово-химических ПРС систем «субстрат – реагент» приведены в табл. 2. Определено, что наиболее энергетически выгодные и конформационно устойчивые системы «субстрат – реагент» имеют состав $[\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_4] - (\text{MonoEtgl-tPht})_2$ и $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_2] - (\text{DiEtgl-tPht})_2$.

Таблица 2

Значения квантово-химических ПРС систем «субстрат – реагент»

Квантово-химические параметры	Системы «субстрат – реагент»	
	$[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_2] - (\text{DiEtgl-tPht})_2$	$[\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_4] - (\text{MonoEtgl-tPht})_2$
$E_{\text{НОМО}}$, эВ	– 7,035	– 10,215
$E_{\text{ЛУМО}}$, эВ	1,076	0,921
η , эВ	8,111	11,136
ΔN	0,695	0,515
E, ккал/моль	– 339,11	– 159,18

Таким образом, если MonoEtgl-tPht и DiEtgl-tPht ввести в состав комплексного флотореагента, то в процессе нейтрализации кислых технологических растворов можно создать условия для поэтапного селективного выделения из них цинка в кислой среде, меди – в щелочной. Для практики ионной флотации тяжелых и цветных металлов из техногенных вод медно-цинковых предприятий разработан комплексный реагент (реагент РОЛ), представляющий собой стабильную эмульсию моноэтиленгликольтерефталата MonoEtgl-tPht , диэтиленгликольтерефталата DiEtgl-tPht и терефталевой кислоты tPht-H . Разработан доступный способ получения реагента РОЛ из вторичного полиэтиленгликольтерефталата (ПЭТ-тары) методом химической деструкции, средняя стоимость реагента составила 9 руб./кг. Лимитирующий показатель вредности – общий, ПДК реагента РОЛ равно $0,3 \text{ мг/дм}^3$, класс опасности – 4.

Состав реагента определен хроматографическим методом, наличие в нем моноэтиленгликольтерефталата, диэтиленгликольтерефталата и терефталевой кислоты подтверждено данными элементного и ИК-фурье-анализа. На основании спектра ИК-фурье (рис. 1) установлено, что реагент РОЛ содержит гетерополярные соединения, молекулы которых включают гидроксильные – OH, сложноэфирные – $\text{C}(\text{O})-\text{O}-\text{C}$, карбоксильные – $\text{C}(\text{O})-\text{O}-\text{H}$ группы и ароматические структуры.

Эмпирические формулы соединений «субстрат – реагент РОЛ» и их молекулярные массы установлены по данным масс-спектрометрии. Сублат $\text{Zn} + \text{РОЛ}$ содержит два соединения: $\text{C}_{20}\text{H}_{26}\text{O}_{14}\text{Zn}$ молекулярной массой 555 и $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{O}_{12}\text{Zn}$ молекулярной массой 467. В состав сублата $\text{Cu} + \text{РОЛ}$ входят три соединения: $\text{C}_{20}\text{H}_{22}\text{O}_{12}\text{Cu}$ молекулярной массой 518, $\text{C}_{24}\text{H}_{30}\text{O}_{14}\text{Cu}$ молекулярной массой 606 и $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{O}_{12}\text{Cu}$ молекулярной массой 466.

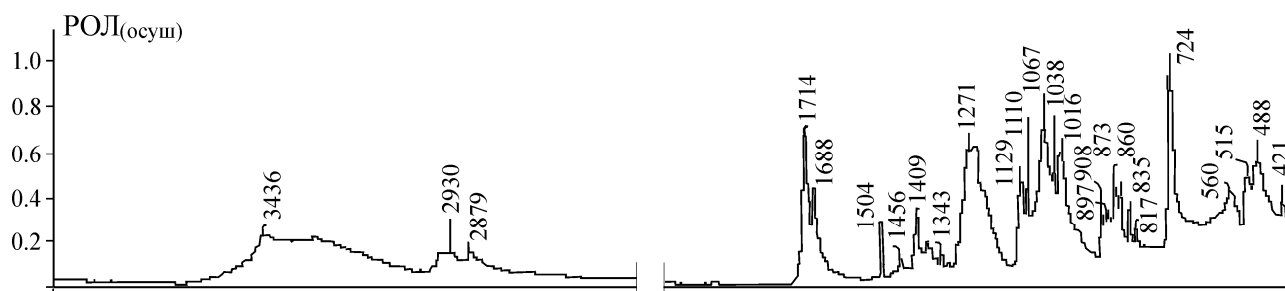
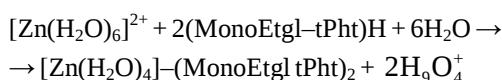
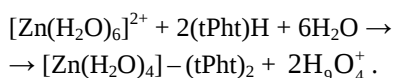


Рис. 1. Фурье-ИК-спектры реагента РОЛ

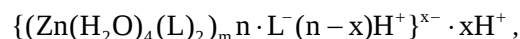
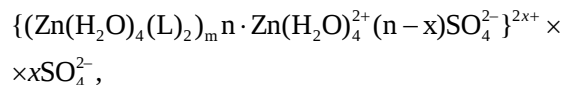
Взаимодействие цинка с компонентами реагента РОЛ в ходе первой стадии ионной флотации при pH 2–3 может быть представлено как результат реакций с моноэтиленгликольтерефталатом с образованием цинксо-державшего продукта $[\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_4]-(\text{MonoEtgl}-\text{tPht})_2$ с молекулярной массой 555:



и с терефталевой кислотой с образованием $[\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_4]-(\text{tPht})_2$ с молекулярной массой 467:

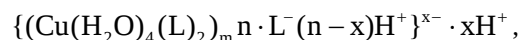


Цинковый сублат представляет собой золь, состав которого, учитывая значительное количество сульфат-ионов в матрице техногенных вод, следующий:



где L – $(\text{MonoEtgl}-\text{tPht})^-$ или $(\text{tPht})^-$. Он извлекается в пенный продукт за счет гетерофазной коагуляции.

Медный сублат, образованный на второй стадии ионной флотации, при pH 7–8 – золь, частицы которого в кислых растворах имеют следующую структуру:



где L – $(\text{MonoEtgl}-\text{tPht})^-$, $(\text{DiEtgl}-\text{tPht})^-$ или $(\text{tPht})^-$. Частицы золя извлекаются в пенный продукт за счет гетерофазной коагуляции.

Низкие произведения растворимости, свидетельствующие о прочности соединений, входящих в состав сублата Zn+РОЛ, а также комплексов меди с компонентами реагента РОЛ, были рассчитаны нами. Их значения: $\text{PP}([\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_4]-(\text{MonoEtgl}-\text{tPht})_2)$ равно $1,85 \cdot 10^{-18}$; $\text{PP}([\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_4]-(\text{tPht})_2)$ равно $1,71 \cdot 10^{-18}$; $\text{PP}([\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_2]-(\text{MonoEtgl}-\text{tPht})_2)$ равно $7,2 \cdot 10^{-21}$; $\text{PP}([\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_4]-(\text{tPht})_2)$ равно $1,40 \cdot 10^{-21}$; $\text{PP}([\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_2]-(\text{DiEtgl}-\text{tPht})_2)$ равно $1,60 \cdot 10^{-22}$.

Определены оптимальные условия селективного извлечения цинка и меди в пенную фракцию. При изучении зависимости степени извлечения цинка и

меди от расхода реагента РОЛ учитывали, что для всех соединений, входящих в сублаты, соотношение медь-реагент и цинк-реагент по данным масс-спектрологии составляет 1:2 (стехиометрическое соотношение). Результаты, полученные после проведения серии флотационных опытов на модельных растворах с исходной концентрацией ионов меди (II) и цинка (II) 1,0 г/дм³, в которых количество введенного реагента варьировало от 20 до 150 % от стехиометрического для каждого из извлекаемых металлов, показали, что с введением 10 % избытка реагента РОЛ степень извлечения достигает максимума (90,3 % для цинка и 96,4 % для меди) и при дальнейшем увеличении количества введенного реагента не изменяется.

Для определения влияния pH на извлечения цинка и меди в присутствии железа была проведена серия опытов на модельных растворах с исходным содержанием ионов цинка – 170,0 мг/дм³; меди (II) – 250,0 мг/дм³; железа – 220,0 мг/дм³ при расходе реагента 0,5 г/дм³ (рис. 2).

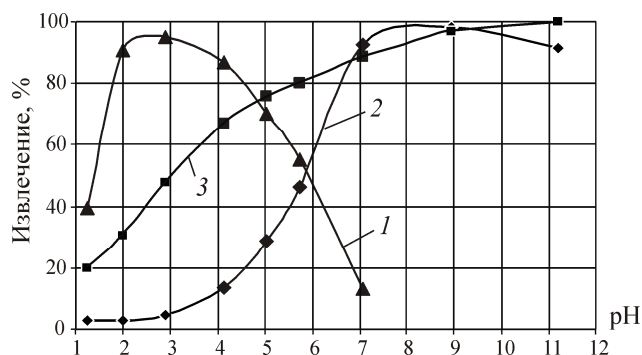


Рис. 2. Влияние pH модельных растворов на извлечение цинка (1), меди (2) и железа (3) реагентом РОЛ методом напорной флотации

Установлено, что максимум извлечения цинка наблюдается в интервале pH 2–3 и достигает 94,86 %. При увеличении pH до 7,0 извлечение цинка постепенно уменьшается до 12,80 %. В области максимального извлечения цинк в растворах находится в виде аквакатионов $[\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_n]^{2+}$. Кривая зависимости флотационного извлечения ионов меди (II) от концентрации ионов водорода проходит через максимум при pH 7,0–8,0. Извлечение меди (II) в интервале pH 2–3 составляет не более 4,5 %, а при pH 7–8 достигает

98,2%. При pH 10 извлечение меди падает до 95,5%. Область значений pH, наиболее благоприятных для флотационного извлечения меди с помощью реагента РОЛ, совпадает с областью, соответствующей нахождению меди в форме гидроксида $\text{Cu}(\text{OH})_2$. Для ионов железа извлечение в пенный продукт соответствует условиям кислотно-основного осаждения Fe^{2+} и Fe^{3+} во всем изучаемом интервале значений водородного показателя [4].

Проведена серия экспериментов на модельных растворах для кинетической оценки процесса и выяснения оптимального времени флотации при тех же условиях, что и при изучении влияния pH на процесс флотации. По результатам исследований установлено, что оптимальное время извлечения меди 8–10 мин, цинка – не менее 10 мин. На основании научно обоснованного выбора реагента-собираателя для флотационного извлечения цинка и меди из кислых рудничных вод, изучения процессов получения гидролитических осадков, образующихся в процессе поэтапной нейтрализации, их реологических свойств и фракционной структуры разработана ресурсовоспроизводящая технология, адаптированная к условиям Гайского горно-обогатительного комбината [5].

Выводы

- Обоснован выбор эффективных органических реагентов для извлечения цинка и меди (II) из техногенных вод методом ионной флотации на основании комплекса ПРС субстратов, реагентов и извлекаемых систем «субстрат – реагент».
- Выявлен новый класс эффективных реагентов-собирающих для ионной флотации цинка и меди – сложные эфиры терефталевой кислоты, имеющие оптимальный набор квантово-химических ПРС.

Сведения об авторах

Медяник Надежда Леонидовна – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой химии, технологии упаковочных производств ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел. 8(3519)298522. E-mail: chem@magtu.ru.

Варламова Ирина Александровна – канд. пед. наук, доц. кафедры химии, технологии упаковочных производств ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.: 8(3519)298533. E-mail: Varlamova156@gmail.com.

Калугина Наталья Леонидовна – канд. пед. наук, доц. кафедры химии, технологии упаковочных производств ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел. 8(3519)298533. E-mail: nkalugina@gmail.com.

• Определено, что наиболее энергетически выгодные и конформационно устойчивые системы «субстрат – реагент» имеют состав $[\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_4] - (\text{MonoEtgl} - \text{tPht})_2$ и $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_2] - (\text{DiEtgl} - \text{tPht})_2$.

• Для практики ионной флотации цинка и меди (II) разработан новый комплексный реагент РОЛ. С аквакатионами цинка $[\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_n]^{2+}$ при pH 2–3 реагент образует малорастворимые соединения состава $[\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_4] - (\text{MonoEtgl} - \text{tPht})_2$ и $[\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_4] - (\text{tPht})_2$, извлекаемые в пенный продукт за счет гетерофазной коагуляции. Установлено, что компоненты реагента взаимодействуют с предварительно выделенным при pH 7–8 гидрофильным аморфным осадком $\text{Cu}(\text{OH})_2$ с образованием гидрофобных труднорастворимых внутримолекулярных соединений $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_2] - (\text{MonoEtgl} - \text{tPht})_2$, $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_2] - (\text{DiEtgl} - \text{tPht})_2$ и $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_4](\text{tPht})_2$, флотационное извлечение которых в пенный продукт осуществляется также за счет гетерофазной коагуляции.

Список литературы

1. Выбор высокоэффективных реагентов для флотационного извлечения ионов меди (II) и цинка из техногенных гидроминеральных ресурсов / Медяник Н.Л., Варламова И.А., Калугина Н.Л., Гирева Х.Я. // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2010. Т. 43. №3. С. 91-96.
2. Прогнозирование свойств реагентов по их квантово-химическим дескрипторам / Медяник Н.Л., Калугина Н.Л., Варламова И.А., Строкань А.М. // Изв. вузов. Горный журнал. 2011. №3. С. 83-89.
3. Shadrunkova I., Medyanik N., Varlamova I., Kalugina N. Forecasting of reagents properties by their quantum-chemical descriptors // XIV Balcan mineral processing congress. Tuzla, 2011, vol. 1.
4. Калугина Н.Л., Варламова И.А., Медяник Н.Л. Изучение возможности селективного извлечения меди методом известкования из сточных вод горных предприятий // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2010. №2. С. 188.
5. Методология создания ресурсовоспроизводящих технологий переработки техногенного гидроминерального сырья / Медяник Н.Л., Калугина Н.Л., Варламова И.А., Строкань А.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №1. С. 5-9.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

FEATURES OF ORGANIC COMPLEXING AGENT ASSORTMENT BY QUANTUM CHEMICAL METHOD FOR HEAVY METAL CATION SELECTIVE EXTRACTION FROM SOLUTIONS

Medianik Nadezhda Leonidovna – D.Sc. (Eng.), professor, Head of Chemistry, Packaging Industry Technologies department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Phone: 8(3519) 298522. E-mail: chem@magtu.ru

Varlamova Irina Alexandrovna – Ph.D. (Education), associate professor, Chemistry, Packaging Industry Technologies department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Phone: 8(3519)298533. E-mail: Varlamova156@gmail.com.

Kalugina Natalia Leonidovna – Ph.D. (Education), associate professor, Chemistry, Packaging Industry Technologies department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Phone: 8(3519)298533. E-mail: nlkalugina@gmail.com.

Abstract. Non-ferrous metals separate quantitative extraction from solutions is possible with effective organic reagents, which were chosen by quantum chemical calculating method of both extractive components and extracting reagents reactivity parameters.

Keywords: organic reagents, nonferrous metals, solutions, quantum chemical method, parameters of the reactivity.

References

1. Medyanik N.L., Varlamova I.A., Kalugina N.L. Vybór vysokoefektivnykh reagentov dlya flotatsionnogo izvlecheniya ionov medi (II) i tsinka iz tekhnogennykh gidromineral'nykh resursov / [Selection of efficient flotation reagents for the extraction of copper (II) and zinc ions from industrial hydroresources]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik ISTU], 2010, vol. 43, no. 3, pp. 91-96.
2. Medyanik N.L., Kalugina N.L., Varlamova I.A., Stokan A.M. Prognostirovanie svoystv reagentov po ikh kvantovo-khimicheskim deskriptoram. [Predicting the properties of reagents using their quantum-chemical descriptors]. *News of higher educational institutions. Mining Journal*, 2011, no. 3, pp. 83-89.
3. Shadrinova I., Medyanik N., Varlamova I., Kalugina N. Forecasting of reagents properties by their quantum chemical descriptors // *XIV Balcan mineral processing congress*, Tuzla, 2011, vol. 1.
4. Kalugina N.L., Varlamova I.A., Medyanik N.L. Explore the possibility of selective extraction of copper by liming of waste water mines. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. [Vestnik ISTU]. 2010, no. 2, pp. 188.
5. Medyanik N.L., Kalugina N.L., Varlamova I.A., Stokan A.M. The methodology of creating of reproducing resources technologies of recycling hydro-technogenic raw. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 1, pp. 5-9.

УДК 669.162:669.2/8

Чесноков Ю.А., Леонтьев Л.И., Шешуков О.Ю., Дмитриев А.Н., Витькина Г.Ю., Маршук Л.А.

ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА*

Аннотация. Проведена разработка новых технологических решений, позволяющих добиться утилизации максимального количества красных шламов, осуществить сравнительный анализ различных вариантов и схем пирометаллургической переработки красных шламов. Проведены лабораторные исследовательские испытания по определению металлургических свойств и технологии спекания высокоосновного агломерата при введении от 1 до 3% красных шламов в шихту аглофабрики ОАО «ЕВРАЗ КГОК». Изучено, что положительное влияние улучшения прочности агломерата при использовании красного шлама практически нивелируется снижением общего содержания железа в шихте. Для сохранения содержания железа на уровне базовых значений в шихте доменной плавки предложено использовать несколько вариантов.

Ключевые слова: пирометаллургия, переработка отходов, красные шламы, металлургические свойства, доменная плавка.

В настоящее время во всем мире истощаются запасы высококачественного минерального сырья. В этой связи, предприятия, например алюминиевой промышленности, вынуждены импортировать необходимое по качеству сырье или вовлекать в переработку новые месторождения низкосортных бокситовых руд с высоким содержанием соединений железа (18-25%), что приводит к неизбежному увеличению отходов – красных шламов. Кроме того, взаимодействуя со щелочными и алюминатными растворами, эти шламы образуют ряд труднорастворимых химических соединений. В результате, помимо гематита, в составе шламов находится много ценных компонентов, таких как алюминий, титан, кремний и редкоземельные элементы (тантал, скандий). Поэтому до сих пор не снижается актуальность поиска альтернативных малоотходных способов комплексной переработки бокситовых руд, а также новых решений по проблеме утили-

зации красных шламов.

Институтом металлургии УрО РАН в предыдущие годы были проведены многочисленные лабораторные и полупромышленные исследования в области переработки бокситов и утилизации красных шламов [1-5].

Целью настоящего исследования является разработка новых технологических решений, позволяющих добиться утилизации максимального количества красных шламов, осуществить сравнительный анализ различных вариантов и схем пирометаллургической переработки красных шламов. Объектом исследования являлись красные шламы филиала «УАЗ-СУАЛ» ОАО «СУАЛ». Для расчетного анализа использовалась разработанная в ИМЕТ УрО РАН балансовая логико-статистическая модель доменного процесса [6].

Проведены лабораторные исследовательские испытания по определению металлургических свойств и технологии спекания высокоосновного агломерата при введении от 1 до 3% красных шламов в шихту аглофабрики ОАО «ЕВРАЗ КГОК» (табл. 1-4).

* Работа выполнена в рамках Государственного контракта №14.515.11.0036 «Разработка научно-технических основ утилизации и переработки отходов металлургического производства для применения их при получении железорудного сырья для доменного производства чугуна».

Таблица 1

Химический состав исходных материалов, масс. %

Материал	Fe _{общ}	FeO	CaO	MgO	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	R ₂ O	Ппп (V ₂ O ₅)
Красный шлам	28,36	5,88	21,32	0,63	9,24	4,14	12,35	0,30	0,60	0,90	0,76	10,30
Концентрат КГОК	62,30	28,8	1,21	3,00	3,72	2,69	2,46	0,15	0,003	0,10	–	(0,59)

Таблица 2

Химический состав флюса и топлива для агломерации, масс. %

Материал	Fe _{общ}	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CO ₂ Ca	CO ₂ Mg
Известняк	0,45	53,0	1,6	1,50	0,5	40,0	2,74
	A	S	Vol	W	Зола		
					SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO
Коксик	16,0	0,50	1,20	5,0	52,0	22,4	7,29

Таблица 3

Химический состав полученных агломератов ОАО «ЕВРАЗ КГОК», масс. %

КШ, %	Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	P	S	C	CaO/SiO ₂
0	54,9	14,8	62,1	2,50	4,52	10,6	1,80	2,20	0,20	0,006	0,038	0,12	1,77
1	53,5	–	–	3,23	3,79	11,4	2,09	2,81	0,22	0,018	0,058	0,14	1,92
3	52,3	–	–	3,42	3,98	10,2	2,09	2,54	0,22	0,021	0,074	0,29	1,66

Таблица 4

Показатели спекания при различном содержании в шихте КШ

Содержание КШ, %	Прочность Б+5, %	Истираемость, %	Скорость спекания, мм/мин	Удельная производительность, т/(м ² ·ч)	Выход годового, %
0	59,86	11,23	18,54	0,593	70,92
1	72,90	6,07	15,91	1,075	71,32
3	67,70	8,27	13,46	0,861	69,68

Основным потребителем агломерата ОАО «ЕВРАЗ КГОК» является Нижнетагильский металлургический комбинат (ОАО «ЕВРАЗ НТМК»). Поэтому для анализа была выбрана доменная печь № 5 полезным объемом 2200 м³, в составе шихты которой используются окатыши и агломерат ОАО «ЕВРАЗ КГОК» (53 и 38% соответственно). Кроме того, загружается железобокс ОАО «Высокогорский горно-обогатительный комбинат» (ОАО «ЕВРАЗ ВГОК») с основной частью (CaO/SiO₂) = 4,8 (9%). В качестве базового варианта использованы данные работы доменной

печи за 2010 год. Исходные данные по химическому составу шихтовых материалов, металлургические характеристики для базового варианта также были выбраны средними за 2010 год.

В соответствии с полученными при проведении лабораторных испытаний свойствами опытных агломератов были рассчитаны варианты с введением в шихту доменной печи с 1 и 3% красных шламов. Исходные данные по металлургическим свойствам шихтовых материалов для доменной плавки и результаты сравнительных расчетов представлены в табл. 5 и 6 соответственно.

Таблица 5

Химический состав шихтовых материалов, масс. %

Материал	Fe _{общ}	FeO	CaO	MgO	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	V ₂ O ₅
Окатыши КГОК	60,98	3,64	1,30	1,90	4,07	2,70	2,90	0,24	0,05	0,03	0,56
Железо-флюс	44,34	12,10	25,10	2,00	5,20	0,31	2,15	1,50	0,04	0,29	0,30

Таблица 6

Расчетные показатели доменной плавки агломерата с добавками красного шлама в условиях ОАО «НТМК»

Показатели	Ед. изм.	База НТМК	КШ = 1%	КШ = 3%
Полезный объем печи	м³	2200		
Производительность	т/сут	6241	6235	6141
Общий расход руды	кг/т чугу.	1712,9	1728,8	1742,2
Окатыши КГОК	«	907,8	916,3	923,4
Агломерат КГОК КШ=0%	«	650,9	0,0	0,0
Агломерат КГОК КШ=1%	«	0,0	657,0	0,0
Агломерат КГОК КШ=3%	«	0,0	0,0	662,0
Железофлюс	«	154,2	155,6	156,8
Кокс	«	396,6	394,5	397,9
Выход пыли	кг/т чугу.	39,1	39,4	39,7
Расход ПГ	м³/т чугу.	125,2	125,2	125,2
Дутье				
температура	°С	1206	1206	1206
влажность	гр./м³	8	8	8
кислород	%	28,7	28,7	28,7
«	м³/мин	240,5	240,2	239,7
расход	м³/т чугу.	925,0	924,7	936,7
«	м³/ч	4008,6	4003,7	3994,8
Колошниковый газ				
температура	°С	173,9	176,7	189,5
выход	м³/т чугу.	1474,5	1469,1	1483,7
СО	%	23,6	23,1	23,1
СО₂	%	21,9	22,4	22,3
Н₂	%	9,6	9,5	9,5
Н₂	%	44,9	45,1	45,2
Показатели	Ед.изм.	База НТМК	КШ = 1%	КШ=3%
Степень использования газа η_{CO}	д.ед.	0,493	0,481	0,480
η_{H_2}	д.ед.	0,464	0,457	0,460
Теоретическая температура горения	°С	2006	2005	2012
Состав чугуна				
Si	%	0,10	0,10	0,10
Ti	%	0,15	0,15	0,15
Mn	%	0,327	0,329	0,346
Cr	%	0,105	0,106	0,112
V	%	0,407	0,415	0,436
S	%	0,025	0,018	0,021
C	%	4,666	4,666	4,666
P	%	0,051	0,052	0,054
Fe	%	94,17	94,16	94,11
Температура металла	°С	1450	1450	1450
Выход шлака	кг/т чугу.	347,0	359,0	373,0
Состав шлака				
CaO	%	34,20	34,82	33,34
MgO	%	9,34	9,58	9,77
SiO₂	%	27,97	25,27	25,84
Al₂O₃	%	15,83	16,79	17,34
TiO₂	%	10,38	11,32	11,07
MnO	%	0,41	0,41	0,43
Cr₂O₃	%	0,05	0,05	0,06
V₂O₅	%	0,25	0,23	0,26
S	%	0,80	0,77	0,76
R₂O	%	0,57	0,54	0,91
FeO	%	0,61	0,61	0,60
CaO/SiO₂		1,22	1,38	1,29
Материальный баланс				
приход	кг/т чугу.	3414,7	3428,2	3460,8
расход	кг/т чугу.	3414,7	3428,2	3460,8
Тепловой баланс				
приход	МДж/т чугу	10140,8	10235,2	10350,8
расход	МДж/т чугу	10140,5	10234,7	10350,3

Анализ результатов расчета показывает, что положительное влияние улучшения прочности агломерата при использовании красного шлама практически нивелируется снижением общего содержания железа в шихте. Для сохранения содержания железа на уровне базовых значений в шихте доменной плавки можно использовать несколько вариантов:

- снижение основности высокоосновного агломерата с одновременным поднятием отношения CaO/SiO_2 в железосфлюсе;
- добавка новой железосодержащей составляющей в аглошихту (окалина);
- замена части бентонита шламом при производстве окатышей.

В случае первых двух вариантов изменяются технические условия и регламенты текущего аглодоменного производства, поэтому реализация их представляется труднореализуемой. Более перспективной идеей видится полная или частичная замена шламом дорогостоящего связующего (бентонита) при производстве окатышей, поскольку предварительные лабораторные опыты показывают, что свойства сырых и обожженных окатышей не ухудшаются, а по некоторым параметрам показатели даже повышаются. При этом важно отметить, что поскольку содержание железа в шламе существенно выше, чем в бентоните, общее содержание железа в шихте доменной печи не должно упасть и как результат технико-экономические показатели доменной плавки, по крайней мере, не будут ухудшаться.

При оценке потенциального объема использования отходов алюминиевого производства следует учесть транспортные издержки, поэтому закономерно ограничение существующими региональными предприятиями черной металлургии. Например, для Уральского региона крупными потребителями железорудного сырья являются ОАО «НТМК ЕВРАЗ» и ОАО «ММК». При годовом потреблении 4,038 млн т окатышей и 2,8 млн т агломерата для ОАО «НТМК ЕВРАЗ» и 10,78 млн т агломерата для ОАО «ММК» возможный объем переработанных отходов составит:

$$Q_{\Sigma} = Q_0^{НТМК} + Q_0^{ММК} = ((4,038 \cdot 3,5) / 100 + (2,8 \cdot 3) / 100) + 10,78 \cdot 0,03 \approx 0,550 \text{ млн т / год.}$$

Список литературы

1. Полупромышленные испытания схемы металлургической переработки красных шламов во вращающихся печах / Б.З. Кудинов, А.И. Бычин, Л.И. Леонтьев, В.А. Киселев, В.Б. Фетисов // Цветные металлы. 1967. №1. С. 46.
2. Бычин, А.И. Перспективы комплексной металлургической переработки красных шламов / А.И. Бычин, Б.З. Кудинов // Цветные металлы. 1963. №2. С. 49-52.
3. Еремин, Н.И. Способы комплексной переработки красных шламов с получением металлического железа / Н.И. Еремин // Комплексное использование бокситов: материалы совещ. специалистов ВАМИ-ФКИ. Будапешт, 1972.

4. О комплексной переработке красных шламов глиноземного производства / Б.З. Кудинов, А.И. Бычин, В.А. Киселев, Л.И. Леонтьев, А.С. Вьюхина, Л.П. Дмитриева // Химия и технология глинозема. Новосибирск: Наука, 1971.
5. Исследование процессов восстановления окискованного красного шлама / В.А. Утков, Л.И. Леонтьев, В.Г. Матяш, В.А. Киселев, С.А. Николаев, С.И. Петров // Исследование новых процессов и аппаратов в производстве глинозема и попутных продуктов: сб. тр. Л.: ВАМИ, 1985. С. 114-118.
6. Ченцов, А.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса / А.В. Ченцов, Ю.А. Чесноков, С.В. Шаврин. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 164 с.

Сведения об авторах

Чесноков Юрий Анатольевич – канд. техн. наук, старший науч. сотрудник ИМЕТ УрО РАН, лаборатория пирометаллургии черных металлов, г.Екатеринбург. Тел.: 8 (343) 232-90-25. E-mail: garlics@list.ru.

Леонтьев Леопольд Игоревич – академик, д-р техн. наук, главный науч. сотрудник ИМЕТ УрО РАН, лаборатория пирометаллургии черных металлов, г.Екатеринбург. Тел.: 8 (343) 267-89-20. E-mail: leo@imet.mplik.ru.

Шешуков Олег Юрьевич – д-р техн. наук, зав. лабораторией ИМЕТ УрО РАН, лаборатория пирометаллургии черных металлов, г.Екатеринбург. Тел.: 8 (343) 267-97-15. E-mail: ferro1960@mail.ru.

Дмитриев Андрей Николаевич – д-р техн. наук, проф., главный науч. сотрудник ИМЕТ УрО РАН, лаборатория пирометаллургии черных металлов, г.Екатеринбург. Тел.: 8 (343) 267-89-08. E-mail: andrey.dmitriev@mail.ru.

Витькина Галина Юрьевна – канд. техн. наук, младший науч. сотрудник ИМЕТ УрО РАН, лаборатория пирометаллургии черных металлов, г.Екатеринбург. Тел.: 8 (343) 232-90-69. E-mail: 20procents@mail.ru.

Маршук Лариса Александровна – научный сотрудник ИМЕТ УрО РАН, лаборатория пирометаллургии черных металлов, г.Екатеринбург. Тел.: 8 (343) 267-89-30. E-mail: ferro@ural.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

PYROMETALLURGIC RECYCLING OF ALUMINUM PRODUCTION SCRAPS

Chesnokov Yuriy Anatolyevich – Ph.D. (Eng.), senior research associate, Institute of Metallurgy, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Pyrometallurgy of Ferrous Metals laboratory, Ekaterinburg. Phone: 8 (343) 232-90-25. E-mail: garlics@list.ru.

Leontyev Leopold Igorevich – Academician, D.Sc. (Eng.), chief researcher, Institute of Metallurgy, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Pyrometallurgy of Ferrous Metals laboratory, Ekaterinburg. Phone: 8 (343) 267-89-20. E-mail: leo@imet.mplik.ru.

Sheshukov Oleg Yuryevich – D.Sc. (Eng.), Head of the laboratory, Institute of Metallurgy, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Pyrometallurgy of Ferrous Metals laboratory, Ekaterinburg. Phone: 8 (343) 267-97-15. E-mail: ferro1960@mail.ru.

Dmitriev Andrey Nikolaevich – D.Sc. (Eng.), prof., chief research fellow, Institute of Metallurgy, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Pyrometallurgy of Ferrous Metals laboratory, Ekaterinburg. Phone: 8 (343) 267-89-08. E-mail: andrey.dmitriev@mail.ru.

Vitkina Galina Yuryevna – Ph.D. (Eng.), junior research fellow, Institute of Metallurgy, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Pyrometallurgy of Ferrous Metals laboratory, Ekaterinburg. Phone: 8 (343) 232-90-69. E-mail: 20procents@mail.ru.

Marshuk Larisa Aleksandrovna – research fellow, Institute of Metallurgy, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Pyrometallurgy of Ferrous Metals laboratory, Ekaterinburg. Phone: 8 (343) 267-89-30. E-mail: ferro@ural.ru.

Abstract. The new technological decisions allowing to achieve utilization of red slimes maximum quantity, to carry out the comparative analysis of various options and schemes of pyrometallurgical processing of red slimes are developed. Laboratory researches on determination of metallurgical properties and technology of high-basic agglomerate sintering are carried out in red mud adding from 1 to 3% into furnace charge of agglomerate of «KGOK EVRAZ». It has been studied that positive impact of sinter durability improvement in red slime using is practically leveled by decrease in the general content of iron in furnace charge. To save iron content at the level of basic values in furnace charge of blast furnace smelting it has been offered to use some options.

Keywords: pyrometallurgy, waste processing, red mud, metallurgical properties, blast furnace smelting.

References

7. Kudinov B.Z., Bychin A.I., Leont'ev L.I., Kiselev V.A., Fetisov V.B. Semi-industrial tests of the scheme of metallurgical processing of red slimes in rotating furnaces. *Nonferrous metals*, 1967, no. 1, pp. 46.
8. Bychin A.I., Kudinov B.Z. Aspects of complex metallurgical processing of red slimes. *Nonferrous metals*, 1963, no. 2, pp. 49-52.
9. Eremin N.I. Methods of complex processing of red slimes with receiving metal iron. *Complex use of bauxites: materials of meeting experts of VAMI-FKI*, Budapest, 1972.
10. Kudinov B.Z., Bychin A.I., Kiselev V.A., Leont'ev L.I., Vykina A.S., Dmitrieva L.P. About complex processing of red slimes of aluminous production. *Chemistry and technology of alumina*. Novosibirsk: Science, 1971.
11. Utkov V.A., Leont'ev L.I., Matyash V.G., Kiselev V.A., Nikolaev S.A., Petrov S.I. Investigation of red slime sinter reduction. *Research of new processes and devices in alumina production and passing products: collected papers*. L.: VAMI, 1985, pp. 114-118.
12. Chentsov A.V., Chesnokov Yu. A., Shavrin S.V. *Logic-statistic balance model of blast furnace smelting process*. Ekaterinburg: Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 2003, p. 164.

УДК 669.15-196

Бигеев В.А., Богдановский А.С.

ЭНЕРГОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО ПЕРЕРАБОТКЕ СТАРЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН

Аннотация. В статье рассмотрен способ утилизации использованных автомобильных шин методом пиролиза, при помощи которого можно не только уничтожать различные виды отходов, но и получать готовую продукцию, не нанося вреда экологии.

Ключевые слова: утилизация, автомобильные шины, пиролиз, отходы, экология.

Анализируя информацию о текущем состоянии различных производств, можно говорить о том, что современные достижения в производственных сферах находятся на сегодняшний момент на достаточно высоком уровне. Этот уровень позволяет удовлетворить желания потребителя в полной мере. Однако такую оценку следует давать не всем видам производств. Только единицы технологических циклов можно называть законченными, для остальных это всего лишь условная характеристика. Все это связано с неизбежным накоплением отходов различного характера, которые, так или иначе, оказывают свое вредное воздействие на окружающую среду.

Для решения этой пресловутой проблемы необходимо вовлекать в производственный оборот отходы, которые можно превратить в товарную продукцию, тем самым создавая специализированные предприятия по их использованию и обезвреживанию [1].

Бесконечный рост цен на нефть и природный газ спровоцировал необходимость поиска другого топлива. Источником такого топлива является огромное количество вышедших из эксплуатации автомобильных шин, которые не подвергаются биологическому разложению и огнеопасны.

Несмотря на многообразие способов использования отработанных автомобильных шин, эта проблема

в настоящий момент с достаточной экологической и экономической эффективностью решена не полностью. В ряде случаев шины подвергаются переработке «в крошку», используются в качестве топлива для получения энергии. Однако такие направления являются затратными и малоэффективными, так как не позволяют в полной мере использовать ценные свойства и материалы, содержащиеся в старых шинах.

В основе предлагаемого способа извлечения полезных продуктов из полимерных и резиносодержащих отходов лежит метод пиролиза.

Пиролиз (от греч. *Pur* – огонь, жар и *Lysis* – разложение, распад) термическое разложение органических соединений в среде с недостатком кислорода при различных температурах [2].

В свете данной проблемы была разработана принципиально новая схема переработки отходов, предназначенная для термического разложения углеводородного сырья, которая позволяет решать сразу несколько целевых задач, связанных не только с улучшением экологической обстановки окружающей среды, но и с получением ликвидных продуктов. «Во главе» схемы находится установка для переработки твердых отходов (пат. РФ №110819).

Технологическая схема установки для переработки твердых отходов представлена на рис. 1.

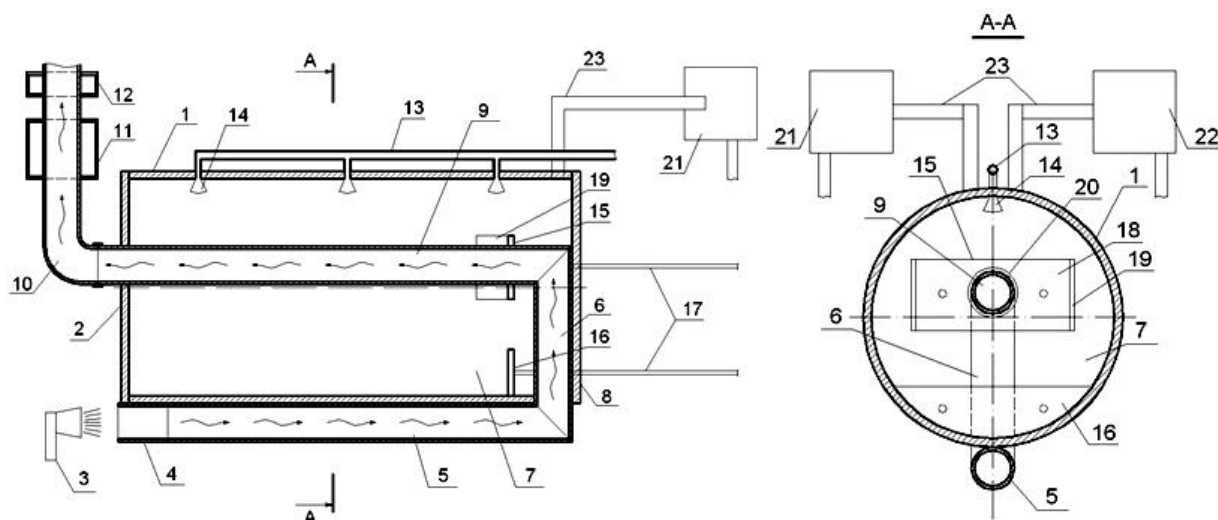


Рис. 1. Технологическая схема установки для переработки твердых отходов: 1 – реактор; 2 – крышка; 3 – топка; 4 – газоход; 5 – нижний участок газохода; 6 – вертикальный участок газохода; 7 – полость реактора; 8 – торцевая стенка; 9 – верхний участок; 10 – изогнутый участок; 11 – утилизатор тепла; 12 – устройство очистки; 13, 14 – система охлаждения; 15-20 – механизм выгрузки; 21-24 – система конденсации

Работает установка следующим образом:

Сырье загружают в полость реактора из жаростойкого материала. Сырье нагревается до определенной температуры и подвергается разложению с образованием газовой смеси, углеродистого остатка и металлолома. Газовая смесь направляется из реактора в охладитель. Там она конденсируется и превращается в жидкое топливо. Образующиеся неконденсируемые горючие газы используются для поддержания стабильной температуры реактора. Углеродистый остаток и металлолом извлекают из полости реактора после завершения процесса.

При этом из некоторого количества данного сырья получают следующие продукты:

- жидкое топливо 40%;
- углеродистый остаток 35%;
- металлолом 15%;
- горючие газы 10%.

В зависимости от вида используемого сырья возможны колебания в объемах получаемых продуктов.

Полученные продукты уже нашли свое применение в промышленности.

Синтетическое жидкое топливо имеет коричневатый цвет и специфический запах. Этот запах обусловлен присутствием большого количества ароматических углеводородов.

На основании обзора технической информации и экспериментальных данных по качеству жидкий продукт пиролиза изношенных автопокрышек можно классифицировать как топливо печное бытовое и наметить следующие направления его использования:

1. В качестве печного бытового топлива для сжигания в котельных различного вида.
2. В качестве альтернативной замены мазута для бытового обогрева.
3. В качестве флотореагента на угольных обогатительных фабриках.
4. Для разгонки на тяжелую мазутную, дизельную, бензиновую, керосиновую фракции на нефтеперерабатывающих предприятиях.

Результаты испытания жидкого топлива представлены в табл. 1.

Углеродистый остаток представляет из себя крошку 0,5-3 см, с отдельными кусочками размером до 8-15 см. Цвет черный, с сероватым оттенком. Структура пористая, частично (до 25%) разрушается, края хрупкие, обламываются.

Основные направления использования углеродистого остатка в качестве готового продукта:

1. Как наполнитель при составлении резиновых смесей, а именно:
 - в различных рецептурах мягких резин [3];
 - в производстве пластмасс и в лакокрасочной промышленности [5].
2. Как сорбент при очистке сточных вод и стоков промышленных предприятий [5].
3. Как активированный уголь, близкий к свойствам

промышленных осветляющих углей марки ОУ-А [3].

4. Как компонент угольной шихты для получения металлургического кокса удовлетворительного качества [6].

5. Как добавка к топливу (углю) для сжигания в котельных [4,7].

Таблица 1

Результаты испытания жидкого топлива

Наименование показателя		Печные топлива		Жидкий продукт
		ТУ 38.101656-87	ТУ 38.101656-05	
Температура вспышки в закрытом тигле, °С	Не ниже	65	45	63
Температура застывания, °С	Не выше	-15	-5	-50
Массовая доля воды, %	Не более	1,0	0,2	0,24
Массовая доля серы, %	Не выше	0,5	1,1	0,4
Плотность при 20°С, кг/м³	Не нормируется	800-970		937
Зольность, %	Не выше	0,02	0,02	0,011
Теплота сгорания, кДж/кг	Не ниже	41454	41454	41380

6. В качестве топливной добавки на стадии предварительного нагрева лома в технологии выплавки стали в конвертере [9].

7. Как вспениватель и карбюризатор при выплавке стали в современных электродуговых печах [9].

9. В качестве топлива для агломерационного производства.

Сравнительная характеристика углеродсодержащих материалов представлена в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительная характеристика углеродсодержащих материалов

Параметр сравнения	Антрацит Кузнецкого бассейна	Продукт пиролиза углеродистый остаток
[C], %	93-97	94-97
[S], %	Не более 1,0	1,49
Зольность, %	4-16	7,78
Летучие, %	4-42	4,07
Теплота сгорания, МДж/кг	29,1-36,01	32,5

Металлом представляет собой металлокорд, канатное изделие различного диаметра, свитое из нескольких тонких высокопрочных стальных проволок.

Химический состав стали, применяемой для изготовления металлокорда, приведен в табл. 3.

Таблица 3

Химический состав стали, применяемой для металлокорда

Сталь	Содержание элементов, %					
	C	Mn	Si	Al	P	S
70 корд	0,65-0,68	0,65-1,30	0,17-0,25	-	0,025	≤ 0,018
70 техно	0,65-0,72	0,65-0,90	0,17-0,35	0,05	≤ 0,025	≤ 0,025
70	0,68-0,73	0,35-0,70	0,35-0,40	0,08	≤ 0,025	≤ 0,025

По классификации фирмы «Даниэли» кордовый металлический лом попадает в разряд качественного лома, это можно увидеть на рис. 2 – содержание остаточных элементов в различных видах шихты.

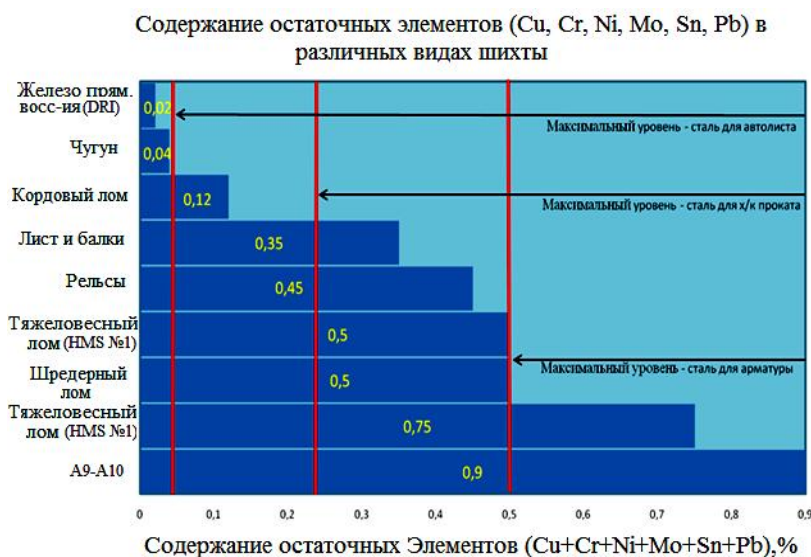


Рис. 2. Содержание остаточных элементов в различных видах шихты

Были произведены расчеты плавов с различными вариантами шихтовки в дуговой сталеплавильной печи (ДСП) по модели, разработанной на кафедре металлургии черных металлов Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова с использованием углеродистого остатка и извлеченного кордового лома, которые показали, что использование извлеченных материалов целесообразно.

Это видно на рис. 3 – содержание примесей в металле при различных вариантах шихтовки.

Содержание примесей цветных металлов в готовой стали с увеличением доли кордового металлического лома уменьшается.

Получаемый неконденсируемый газ можно использовать как топливо для энергетических котлов бытовых и промышленных котельных, двигателей внутреннего сгорания, газовых турбин, сушильных и теп-

лообменных аппаратов разного назначения, т.е. как альтернативу природному газу или жидким видам топлива.

Выявляя преимущества отдельно взятой установки для переработки твердых отходов и всего энергометаллургического комплекса, можно обозначить, что:

1. Данный процесс требует меньшей подготовки исходного материала по сравнению с другими методами, т.е. исключается процесс измельчения сырья, он менее чувствителен к содержанию в нем влаги.

2. Структура такого предприятия предполагает самообеспечение электроэнергией и собственный выпуск полупродуктов и готовой продукции.

3. Переработка 100% бытовых и некоторых других видов отходов.

4. Высокая экологичность.

Исходя из всего вышеперечисленного, можно сделать вывод, что создание объектов для переработки полимерных и резиносодержащих отходов, в частности старых автомобильных шин, позволит не только экономить первичные энергоресурсы, но и, как следствие, снизить себестоимость выпускаемой продукции в различных отраслях промышленности.

Таким объектом может стать энергометаллургический комплекс по переработке изношенных автомобильных шин, при котором образуются вторичные энергоресурсы, количество и качество которых достаточно для дальнейшего передела других отходов

в полезные продукты, а также для преобразования одного вида энергии в другую.

Содержание примесей в металле в зависимости от варианта шихтовки

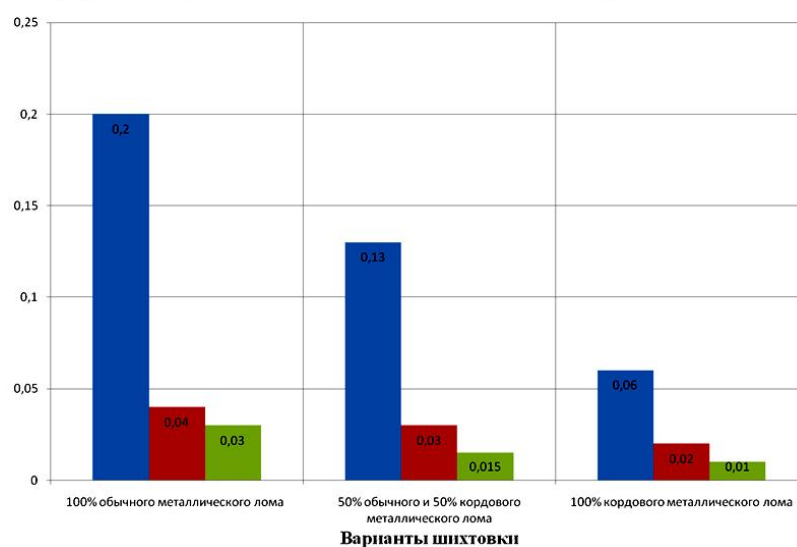


Рис. 3. Содержание примесей в металле при различных вариантах шихтовки

Использование энергоресурсов установки пиролиза для переработки изношенных автомобильных шин представлено на рис. 4.

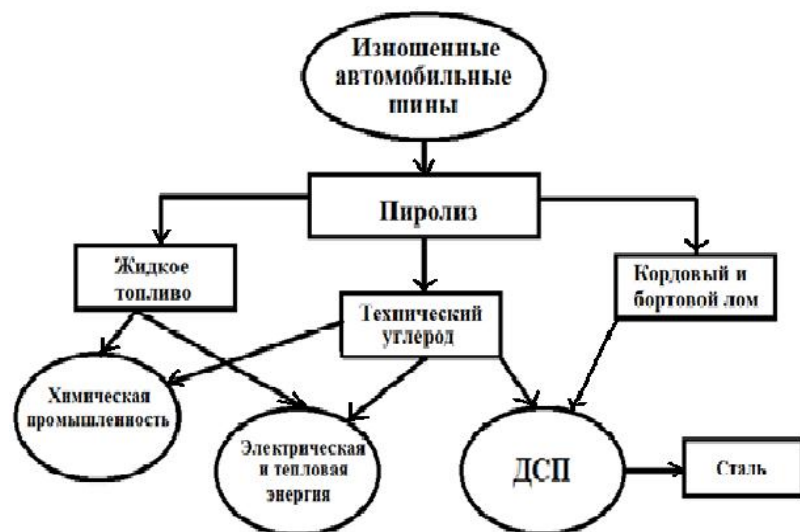


Рис. 4. Направления использования вторичных энергоресурсов установки пиролиза

Сведения об авторах

Бигеев Вахит Абдрашитович – д-р техн. наук, проф., директор института металлургии, машиностроения и материалов обработки, зав. кафедрой металлургии черных металлов ФГБОУ ВПО «Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова». Тел.: 29-85-59. E-mail: v.bigeev11@yandex.ru.

Богдановский Александр Сергеевич – аспирант ФГБОУ ВПО «Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова». E-mail: sasha174@inbox.ru.

Список литературы

1. Косырев К.Л., Фоменко А.П. Энергометаллургический комплекс – ключ к решению проблемы переработки техногенных отходов // Черная металлургия. 2012. №10.
2. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://dic.academic.ru>
3. Глезин И.Л., Вишнев В.Г., Боровиков Г.И. Новые возможности использования сланцеперерабатывающих агрегатов // Нефтепереработка и нефтехимия. 2002. № 10.
4. Использование отработанных автомобильных покрышек / Волынкина Е.П., Кудашкина С.А., Незамаев А.В. и др. // Экология и промышленность России. 2004. № 1.
5. Тимонин А.С. Инженерно-экологический справочник. Т.3. Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2003.
6. Пат. 2202903 ФРГ, кл 10в, 16/17 (с 10 15/48) 1972. Способ утилизации и использование отработанных покрышек автомашин.
7. Утилизация отработанных автомобильных покрышек / Волынкина Е.П., Кудашкина С.А., Охотников В.Ф. и др. // Экология и промышленность России. 1999. № 3.
8. Исследование свойств резины, наполненных остаточным углеродом – продуктом пиролиза изношенных автопокрышек / Алаичев В.А., Граборова Е.М., Емельянов Д.П. и др. // Совершенствование производства технического углерода: сб. науч. тр. ЦНИИПЭ нефтехим. Москва, 1979.
9. Старке Э.П., Страхов В.М. Карбюризатор на основе бурого кокса для химико-термической обработки стали // Кокс и химия. 2003. №9.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ENERGY METALLURGICAL COMPLEX ON OLD AUTOMOBILE TIRE RECYCLING

Bigeev Vahit Abdrashitovich – D.Sc. (Eng.), professor, Director of «Metallurgy, Mechanic Engineering and Materials Processing» Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Phone: 8(3519)29-85-59. E-mail: v.bigeev11@yandex.ru.

Bogdanovsky Alexander Sergeevich – a postgraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University. E-mail: sasha174@inbox.ru.

Abstract. This article considered the method of disposal of utilized tires by pyrolysis, with the help of which you can not only destroy the various types of waste, but get ready products without harming the environment.

Keywords: recycling, tires, pyrolysis, waste, ecology.

References

1. Kosirev K.L., Fomenko A.P. Jenergomettallurgicheskij kompleks – ključ k resheniju problemy pererabotki tehnogennyh othodov. [Energy and metals complex – the key to solving the problem of recycling industrial waste]. *Chernaja metallurgija*. [Metallurgy Bulletin scientific, technical and economic information]. 2012, no. 10.
2. Electronic resource. Mode of access: <http://dic.academic.ru>
3. Glezin I.L., Cherry V.G., boletus G.I. Noveye vozmozhnosti ispol'zovaniya slancepererabatyvajushih agregatov [New features of the oil shale units]. *Refining and Petrochemicals*. 2002, no. 10.
4. Volynkina E.P., Kudashkin S.A., Nezamaev A.V. etc. Ispol'zovanie otrabotannyh avtomobil'nyh pokryshek. [The use of used car tires]. *Ecology and Industry of Russia*. 2004, no. 1.
5. Timonin A.S. *Inzhenerno-ekologicheskij spravochnik*. [Engineering and Environment Book]. Kaluga: Univ. N. Botchkareva, 2003, vol. 3.
6. Pat. Germany number 2202903 cl 10c, 16/17 (10-15/48), 1972. *Method of disposal and use of waste tires of motor vehicles*.
7. Volynkina E.P., Kudashkin S.A. Hunters V.F. etc. Utilizacija otrabotannyh avtomobil'nyh pokryshek. [Dispose of used tires]. *Ecology and Industry of Russia*, 1999, no. 3.
8. Alaichev V.A., Graborova E.M., Emelyanov D.P. et al. Issledovanie svojstv reziny, napolnennyh ostatocnym uglerodom – produktom piroliza iznoshennyh avtopokryshek. [Study of the properties of rubber filled with residual carbon - the product of pyrolysis of used tires]. *Improvement of production of carbon - the product of pyrolysis of used tires*. *TSNIIPE Petrochemical*, Moscow, 1979.
9. Stark E.P., Fears V.M. Karbjurizator na osnove burougol'nogo koksa dlja himiko-termicheskoj obrabotki stali. [Carburizator based on lignite coke chemical heat treatment of steel]. *Coke and Chemistry*, 2003, no. 9.

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.3

Катренов Б.Б., Жумашев К.Ж., Селиванов Е.Н.

ВЛИЯНИЕ МЕДНОГО КУПОРОСА НА ДИНАМИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ОКАТЫШЕЙ ИЗ МЕДНОГО КОНЦЕНТРАТА

Аннотация. В статье рассматривается влияние медного купороса на показатели динамической прочности высушенных окатышей из медного концентрата. Предложено использовать медный купорос в качестве добавки к водному раствору лигносульфоната, используемого в качестве связующего при грануляции медного концентрата. Такое решение позволяет снизить плотность раствора связующего с 1,09 до 1,04 г/см³ и, таким образом, сократить расход лигносульфоната на грануляцию.

Ключевые слова: окатыши из медного концентрата, динамическая прочность окатышей, медный купорос, водный раствор лигносульфоната.

Концентраты, выделяемые в ходе обогащения медных руд, представляют собой механическую смесь дисперсных частиц, которая мало пригодна для последующей переработки в обжиговых печах вследствие пылевыноса. С целью уменьшения пылевыноса медные концентраты целесообразно подвергать окатыванию. При этом большое значение имеет получение окатышей, выдерживающих статические и динамические (ударные) нагрузки, возникающие при хранении в бункерах, транспортировке и перегрузках, а также при переработке в обжиговых печах. В процессе окучкования медного концентрата в качестве связующего традиционно используется жидкий технический лигносульфонат, его раствор получают путём растворения порошка в воде. Это связующее обеспечивает достаточную прочность окатышей, однако высокая стоимость лигносульфоната требует поиска вариантов сокращения его расхода.

Ранее [1] исследовано влияние медного купороса на статическую прочность окатышей из медного концентрата и показана целесообразность его применения в качестве добавки к раствору лигносульфоната. Введение $\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$ в состав шихты окочкования позволяет снизить плотность раствора лигносульфоната с 1,09 до 1,02 г/см³ при достижении одинаковой прочности окатышей.

Учитывая, что окатыши помимо статических подвергаются также и динамическим нагрузкам, проведено исследование влияния медного купороса на динамическую прочность окатышей. Согласно вероятностной теории прочности конгломератов прочность окатышей при наложении статической, динамической и иных видов нагрузок определяется по вероятностной модели, которая в общем виде представлена следующим уравнением, отражающим вероятность сохранности окатышей (P) при наложении нагрузки [2]:

$$P = 0,5^{(\varepsilon_H / \varepsilon_H)^6}, \quad (1)$$

где ε_H – энергия нагрузки на окатыш, Дж; ε_H –

энергия образования поверхности разрушения, Дж.

Представленное выражение основано на вероятностном характере разрушения под действием нагрузок. Вероятность разрушения связана с долей разрушенного материала, а вероятность сохранности – с долей оставшегося целым. Энергии образования поверхности разрушения противопоставляется энергия нагрузки, а их соотношение определяет увеличение или уменьшение доли разрушенных или целых кусков. Энергию образования поверхности разрушения можно выразить по формуле

$$\varepsilon_H = \rho \times S, \quad (2)$$

где ρ – поверхностное натяжение окатышей, Дж/м²; S – площадь образованной поверхности разрушения, м².

Эффективное поверхностное натяжение окатышей ρ относится к поверхности разрушения и приобретает смысл физико-химической характеристики связности комка, его сопротивляемости разрушению. Что касается площади образованной поверхности, то ее измерение, ввиду статистического характера распределения осколков разрушения по размерам, в принципе возможно, но не обязательно. В любом случае эта поверхность определяется исходным диаметром окатыша (d) и пропорциональна площади диаметрального сечения ($\pi d^2/4$). В первом приближении можно принять идеальный случай разрушения окатыша только на две половины, при котором площадь образованной поверхности равна

$$S = \pi d^2/2. \quad (3)$$

В этом случае поверхностное натяжение ρ , отвечающее истинной энергии ее образования при разрушении, будет завышенным и потому квалифицируется как эффективное. Однообразие завышения позволяет рассматривать эту характеристику как приемлемую для сравнительного анализа прочности материалов при различных видах нагрузок [3].

Энергию удара, возникающую в окатышах в случае приложения динамических нагрузок, можно представить как потенциальную:

$$\mathcal{E}_H = mgh, \quad (4)$$

где m – масса окатыша, кг; $g = 9,82 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; h – высота падения, м.

С учетом этого выражение для динамической прочности окатышей по формуле (1) имеет вид

$$P_y = 0,5 \left(\frac{2mgh}{\pi d^2 \rho_y} \right)^6, \quad (5)$$

где P_y – доля целых гранул при ударной нагрузке (падении с определенной высоты), доли ед.; ρ_y – эффективное поверхностное натяжение при ударной нагрузке, Дж/м².

Масса и диаметр окатыша связаны между собой через экспериментально определяемую насыпную массу (γ , кг/м³):

$$\gamma = m/d^3. \quad (6)$$

Подстановкой этого выражения в формулу (5) получаем вероятностную модель для расчета динамической прочности окатышей:

$$P_y = 0,5 \left(\frac{2d\gamma gh}{\pi \rho_y} \right)^6. \quad (7)$$

Эксперименты по оценке влияния медного купороса на динамическую прочность окатышей проводили с использованием метода вероятностно-детерминированного планирования эксперимента [2] по плану шестифакторного эксперимента на пяти уровнях. Факторами, которые варьировали в этом плане, являлись плотность раствора связующего, температура сушильного агента, продолжительность сушки, диаметр окатышей (табл. 1).

Таблица 1

Варьируемые факторы и их значения

№	Факторы	Уровни факторов				
		1	2	3	4	5
1	Плотность раствора связующего γ_L , г/см ³	1,02	1,04	1,06	1,08	1,09
2	Температура сушильного агента t_c , °C	80	100	120	150	180
3	Продолжительность сушки окатышей τ_c , мин	5	10	15	20	25
4	Диаметр окатышей d , м	0,005	0,007	0,009	0,011	0,013
5	Вакантный фактор, X_5	1	2	3	4	5
6	Вакантный фактор, X_6	1	2	3	4	5

Исходным материалом служил концентрат, содержащий %: 13,8 Cu; 3,3 Pb; 4,1 Zn; 29,9 Fe; 34,8 S; 8,1 SiO₂; 2,0 Al₂O₃; 1,0 CaO; 0,94 As. Концентрат окатывали на лабораторном грануляторе с диаметром

чаши 0,5 м, высотой борта 15 см, угле наклона 45°, при скорости вращения 20 об/мин и подаче связующего разбрызгиванием. Угол наклона гранулятора составлял 45°. Эксперименты по окатыванию медного концентрата проводили с применением в качестве связующего как водного раствора лигносульфоната, так и водного раствора медного купороса с лигносульфонатом. Сушку окатышей проводили на решетке, под которую подавался нагретый до заданной температуры воздух. После сушки определяли динамическую прочность окатышей: высоту падения ($h_{0,5}$), при которой достигается половинный выход целых кусков ($P_y = 0,5$), и эффективное поверхностное натяжение (ρ_y^3). Величину $h_{0,5}$ определяли на приборе, имитирующем падение на гранулу груза с массой, превышающей массу гранулы (m). Пересчет высоты падения груза с массой m_G на высоту падения гранулы h проводили, приравняв потенциальные энергии падения груза и гранулы:

$$h = m_G h_G / m. \quad (8)$$

Пересчет на эффективное поверхностное натяжение (ρ_y^3) производится по формуле

$$\rho_y^3 = \frac{2d\gamma gh_{0,5}^3}{\pi}. \quad (9)$$

Результаты опытов по определению характеристик динамической прочности высушенных окатышей, полученных с применением в качестве связующего раствора лигносульфоната, представлены в табл. 2.

По полученным экспериментальным данным проведена выборка по четырем частным функциям (рис. 1).

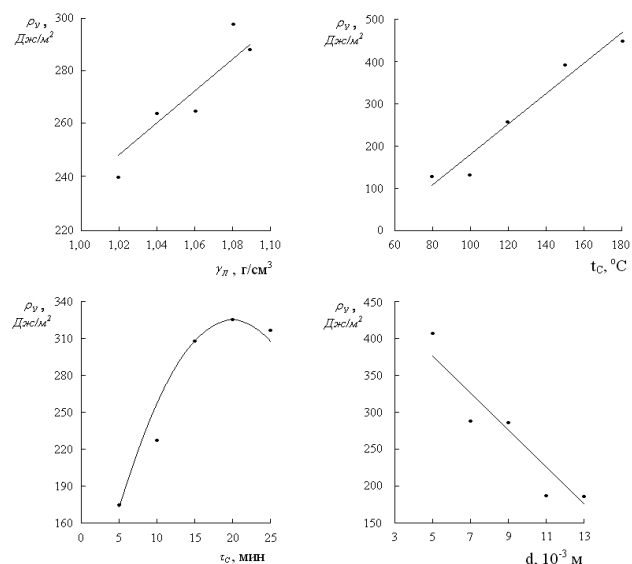


Рис. 1. Частные зависимости эффективного поверхностного натяжения высушенных окатышей, полученных с применением в качестве связующего раствора лигносульфоната, от изучаемых факторов при динамической нагрузке

Таблица 2

Результаты опытов по определению характеристик динамической прочности по экспериментальным (э) и расчетным (р) данным для окатышей, полученных с применением в качестве связующего раствора лигносульфоната

№	$\gamma_{Л}$, г/см ³	t_c , °C	τ_c , мин	d, м	γ кг/м ³	$h_{0,5}^э$, м	$h_{0,5}^p$, м	$\rho_y^э$, Дж/м ²	ρ_y^p , Дж/м ²	P_y^p
1	1,02	80	5	0,005	1200	4,33	2,13	163	80	0,53
2	1,02	120	15	0,009	1276	2,68	3,65	192	262	0,51
3	1,02	100	10	0,007	1312	1,56	3,15	90	181	0,52
4	1,02	180	25	0,013	1179	3,86	3,27	370	313	0,52
5	1,02	150	20	0,011	1285	4,39	3,69	388	326	0,52
6	1,06	120	10	0,013	1183	0,62	1,57	60	151	0,51
7	1,06	100	25	0,011	1247	0,90	1,92	77	165	0,52
8	1,06	180	20	0,005	1200	17,3	20,6	649	774	0,52
9	1,06	150	5	0,009	1125	5,61	3,55	355	225	0,52
10	1,06	80	15	0,007	1166	3,75	2,72	191	139	0,52
11	1,04	100	20	0,009	1262	1,41	2,87	100	204	0,52
12	1,04	180	5	0,007	904	6,45	8,39	255	332	0,52
13	1,04	150	15	0,013	1261	4,15	2,45	425	251	0,52
14	1,04	80	10	0,011	1412	0,37	0,79	36	77	0,51
15	1,04	120	25	0,005	1280	12,5	9,32	500	373	0,52
16	1,09	180	15	0,011	1067	5,28	6,36	388	467	0,52
17	1,09	150	10	0,005	1040	11,5	15,2	374	494	0,52
18	1,09	80	25	0,009	1289	2,66	1,72	193	125	0,52
19	1,09	120	20	0,007	1224	8,33	7,07	447	379	0,52
20	1,09	100	5	0,013	1361	0,30	0,67	33	74	0,53
21	1,08	150	25	0,007	1137	8,97	10,2	447	506	0,51
22	1,08	80	20	0,013	1315	0,45	0,77	48	82	0,52
23	1,08	120	5	0,011	1405	0,53	1,38	51	133	0,51
24	1,08	100	15	0,005	1120	10,0	8,17	350	286	0,52
25	1,08	180	10	0,009	1454	7,08	5,67	580	464	0,52

После подбора аппроксимирующих функций были получены следующие частные зависимости эффективного поверхностного натяжения высушенных окатышей от изучаемых факторов:

$$\rho_y^p = 564\gamma_{Л} - 327, \quad R = 0,9, \quad (10)$$

$$t_R = 8,2 > 2;$$

$$\rho_y^p = 3,65t_c - 189,5, \quad R = 0,96, \quad (11)$$

$$t_R = 23,8 > 2;$$

$$\rho_y^p = 326 - 0,7(\tau_c - 20)^2, \quad R = 0,97, \quad (12)$$

$$t_R = 28,0 > 2;$$

$$\rho_y^p = 500 - 25000d, \quad R = 0,91, \quad (13)$$

$$t_R = 9,27 > 2.$$

Полученные зависимости объединены в обобщенное уравнение Протодяконова [4], имеющее достаточную адекватность в сравнении с экспериментальными данными для 95% уровня достоверности:

$$\rho_y^p = 5 \times 10^{-8} (564\gamma_{Л} - 327) \times (3,65t_c - 189,5) \times [326 - 0,7(\tau_c - 20)^2] \times (500 - 25000d), \quad (14)$$

$$R = 0,84, \quad t_R = 12,5.$$

Доверительный интервал этого уравнения составил

$$\delta = \pm |649 - 33| \frac{1}{12,5} = \pm 49,3 \text{ Дж/м}^2,$$

или в относительной величине

$$49,3 \times 100 / 270,48 = 18,2\%.$$

Возможен расчет первично определяемой экспериментальной величины $h_{0,5}^э$ путем преобразования формулы (9) с заменой экспериментальной величины $\rho_y^э$ на расчетную величину ρ_y^p по данным табл. 2:

$$h_{0,5}^p = \frac{\rho_y^p \pi d^2}{2mg}. \quad (15)$$

Результаты расчета приведены в табл. 2 и характеризуются значениями $R = 0,91$ и $t_R = 22,6$. Доверительный интервал этого уравнения составил $\pm 0,75$ м, или по отношению к средней величине $h_{0,5}^э$ – 15%.

Подставляя уравнение (14) в модель (7), получаем вероятностную модель динамической прочности высушенных окатышей:

$$P_y = 0,5 \left[\frac{1,24 \times 10^8 d \gamma h}{(564\gamma_{Л} - 327)(3,65t_c - 189,5)[326 - 0,7(\tau_c - 20)^2](500 - 25000d)} \right]^6. \quad (16)$$

Проверка адекватности модели по выходу целых окатышей производится путем подставления расчетных величин $h_{0,5}^p$ из табл. 2. Однородность множества

P_y^p проверяется по критерию Налимова. При этом должно соблюдаться неравенство

$$r_{\min}^{\max} = \frac{\left| \bar{x} - x_{\min}^{\max} \right|}{S(x) \sqrt{\frac{n-1}{n}}} \leq r_{cr}, \quad (17)$$

где $x_{\min}^{\max}$ – минимаксная величина множества; $\bar{x}$ – среднее значение; $S(x)$ – среднеквадратическая

Таблица 3

Номограмма динамической прочности высушенных окатышей, полученных с применением в качестве связующего раствора лигносульфоната (продолжительность сушки – 20 мин)

$h, \text{ м}$		2 м			4 м		
$\gamma_L, \text{ г/см}^3$	$t_c, ^\circ\text{C}$ $d, \text{ м}$	120	150	180	120	150	180
1,02	0,005	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	0,007	1,0	1,0	1,0	0,94	0,99	1,0
	0,009	0,99	1,0	1,0	0,42	0,92	1,0
	0,011	0,85	0,98	1,0	0	0,34	0,82
	0,013	0,10	0,79	0,96	0	0	0,07
1,04	0,005	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	0,007	1,0	1,0	1,0	0,96	1,0	1,0
	0,009	0,99	1,0	1,0	0,57	0,95	0,99
	0,011	0,90	0,99	1,0	0	0,49	0,88
	0,013	0,23	0,86	0,97	0	0	0,17
1,06	0,005	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	0,007	1,0	1,0	1,0	0,96	1,0	1,0
	0,009	0,99	1,0	1,0	0,60	0,95	0,99
	0,011	0,90	0,99	1,0	0	0,52	0,89
	0,013	0,25	0,87	0,97	0	0	0,19
1,08	0,005	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	0,007	1,0	1,0	1,0	0,98	1,0	1,0
	0,009	0,99	1,0	1,0	0,72	0,97	0,99
	0,011	0,94	0,99	1,0	0,02	0,66	0,93
	0,013	0,42	0,92	0,98	0	0	0,36
1,09	0,005	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	0,007	1,0	1,0	1,0	0,98	1,0	1,0
	0,009	0,99	1,0	1,0	0,74	0,97	0,99
	0,011	0,94	0,99	1,0	0,03	0,69	0,93
	0,013	0,45	0,92	0,99	0	0,01	0,39

Таблица 4

Содержание лигносульфоната (C_L) и медного купороса в растворах различной плотности

$\gamma_L, \text{ г/см}^3$	$C_L, \%$	Масса раствора, г	Масса твердого лигносульфоната в растворе, г	Масса воды в растворе, г	Расход медного купороса, г
1,02	5,4	1020	55	965	309
1,04	10,6	1040	111	930	298
1,06	15,6	1060	166	894	287
1,08	20,5	1080	221	859	276
1,09	22,8	1090	248	842	270

Полученные водные растворы медного купороса с лигносульфонатом использовались затем для окатышания медного концентрата. Результаты опытов по определению характеристик динамической прочности окатышей, полученных с применением в качестве связующего водного раствора медного купороса с лигносульфонатом, приведены в табл. 5.

ошибка; $n = 25$ – объем множества; r_{cr} – нормированное значение критерия Налимова.

Среднеквадратическая ошибка определяется по формуле

$$S(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (18)$$

Нормированное значение критерия Налимова рассчитывается по формуле

$$r_{cr} = 1,483(n-2)^{0,187}. \quad (19)$$

Однородность множества P_y^P , представленного в табл. 1, по критерию Налимова определяется удовлетворяющимся неравенством

$$r_{\max} = \frac{|0,49 - 0,51|}{0,0082\sqrt{24/25}} = 2,5 \leq r_{cr} =$$

$$= 1,483(25-2)^{0,187} = 2,67.$$

Полученные данные указывают на высокую адекватность и достоверность полученной вероятностной модели (16). Эта модель была использована для расчета номограммы динамической прочности высушенных окатышей (табл. 3) в зависимости от высоты падения (продолжительность сушки – 25 мин). Из номограммы следует, что наиболее прочные окатыши образуются при использовании связующего плотностью 1,09 г/см³.

Водный раствор медного купороса и лигносульфоната готовили исходя из растворимости медного купороса в воде при 20°C [5]. В пересчете на безводный сульфат она составляет 205 г на 1 дм³ воды. Количество медного купороса для приготовления связующего на водной основе меняли в зависимости от содержания в нем лигносульфоната. Расчет массового содержания лигносульфоната в растворах проводили по формуле [6]

$$C_L = \frac{100(1 - 1/\gamma_L)}{1 - 1/\gamma_{LT}}, \quad (20)$$

где C_L – массовое содержание лигносульфоната в растворе, %; γ_{LT} , γ_L – плотности твердого (сухого) лигносульфоната и его раствора, г/см³.

Плотность твердого лигносульфоната составляет 1,568 г/см³. После расчета массового содержания твердого лигносульфоната в растворах определен расход медного купороса на 1 дм³ раствора лигносульфоната (табл. 4).

Таблица 5

Результаты опытов по определению характеристик динамической прочности по экспериментальным (э) и расчетным (р) данным для окатышей, полученных с применением в качестве связующего водного раствора медного купороса с лигносульфонатом

№	$\gamma_{Л}$, г/см ³	t_c , °C	τ_c , мин	d, м	γ кг/м ³	$h_{0,5}^э$, м	$h_{0,5}^p$, м	$\rho_y^э$, Дж/м ²	ρ_y^p , Дж/м ²	P_y^p
1	1,02	80	5	0,005	1520	3,16	1,68	150	80	0,52
2	1,02	120	15	0,009	1180	4,65	3,37	309	224	0,51
3	1,02	100	10	0,007	1254	1,63	2,90	89	159	0,50
4	1,02	180	25	0,013	1243	3,66	3,52	370	356	0,51
5	1,02	150	20	0,011	1202	3,75	3,70	310	306	0,51
6	1,06	120	10	0,013	1361	0,43	1,22	48	135	0,50
7	1,06	100	25	0,011	1225	0,92	1,82	78	153	0,50
8	1,06	180	20	0,005	960	12,5	21,6	375	647	0,50
9	1,06	150	5	0,009	1399	3,92	3,19	309	251	0,51
10	1,06	80	15	0,007	1399	1,67	1,52	102	93	0,50
11	1,04	100	20	0,009	1317	1,56	2,27	116	168	0,50
12	1,04	180	5	0,007	1312	5,78	6,75	332	388	0,51
13	1,04	150	15	0,013	1202	3,79	2,28	370	223	0,50
14	1,04	80	10	0,011	1292	0,41	0,67	36	60	0,51
15	1,04	120	25	0,005	1200	13,3	9,59	499	360	0,51
16	1,09	180	15	0,011	1210	4,97	4,42	414	368	0,50
17	1,09	150	10	0,005	1360	9,41	9,31	400	396	0,51
18	1,09	80	25	0,009	1344	1,43	1,27	108	96	0,51
19	1,09	120	20	0,007	1224	6,19	5,37	332	288	0,51
20	1,09	100	5	0,013	1416	0,27	0,67	31	77	0,50
21	1,08	150	25	0,007	1108	10,5	9,65	509	468	0,50
22	1,08	80	20	0,013	1284	0,35	0,57	37	59	0,49
23	1,08	120	5	0,011	1345	1,12	1,52	104	141	0,52
24	1,08	100	15	0,005	1440	5,56	4,49	250	202	0,50
25	1,08	180	10	0,009	1358	7,58	5,17	579	395	1,358

Выборкой и усреднением экспериментальных данных, относящихся к одинаковым условиям, получены точечные зависимости (рис. 2), показывающие влияние выделенных факторов на динамическую прочность окатышей.

После подбора аппроксимирующих функций были получены следующие частные зависимости:

$$\rho_y^p = 25 + 213\gamma_{Л}, R \approx 0, t_R < 2; \quad (21)$$

$$\rho_y^p = 3,6t_c - 208,2, R = 0,95, \quad (22)$$

$$t_R = 18,3 > 2;$$

$$\rho_y^p = 172,2 + 5,2\tau_c, R = 0,73, \quad (23)$$

$$t_R = 2,7 > 2;$$

$$\rho_y^p = 436 - 20650d, R = 0,93, \quad (24)$$

$$t_R = 11,5 > 2.$$

Обобщающая зависимость в форме уравнения Протодьяконова имеет вид:

$$\rho_y^p = 1,6 \times 10^{-5} (3,6t_c - 208,2) \times (172,2 + 5,2\tau_c) \times (436 - 20650d), \quad (25)$$

$$R = 0,81, t_R = 10,9 > 2.$$

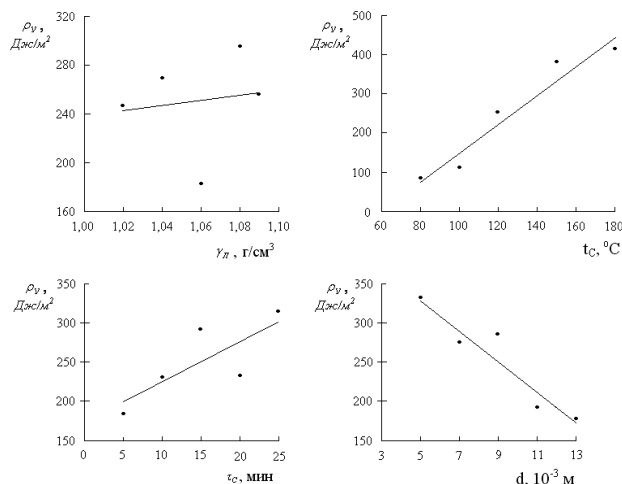


Рис. 2. Частные зависимости эффективного поверхностного натяжения высушенных окатышей, полученных с применением в качестве связующего водного раствора медного купороса с лигносульфонатом, от изучаемых факторов при динамической нагрузке

Доверительный интервал этого уравнения составил

$$\delta = \pm |579 - 31| \frac{1}{10,9} = \pm 50,3 \text{ Дж/м}^2,$$

или в относительной величине 20,1%.

Полученное уравнение (25) использовано для расчета высоты половинного разрушения гранул $h_{0,5}^p$ путем введения в уравнение (15). Результаты расчета приведены в табл. 5 и характеризуются значениями $R = 0,79$ и $t_R = 9,5 > 2$. Доверительный интервал составил $\pm 1,37$ м, или по отношению к средней величине $h_{0,5}^э$ – 30,9%.

Подставляя уравнение (25) в формулу (7), получаем вероятностную модель динамической прочности окатышей:

$$P_y = 0,5 \left[\frac{3,9 \times 10^5 dyh}{(3,6t_c - 208,2) \times (172,2 + 5,2\tau_c) \times (436 - 20650d)} \right]^{16}. \quad (26)$$

Проверка по выходу целых окатышей выполнена подставлением расчетных значений $h_{0,5}^p$ из табл. 5. Однородность множества P_y^p по критерию Налимова определена удовлетворяющим неравенством:

$$r_{\min}^{\max} = \frac{|0,49 - 0,51|}{0,0082 \sqrt{24/25}} = 2,5 \leq r_{cr} = 1,483(25 - 2)^{0,187} = 2,67 \text{ жс},$$

что подтверждает высокую адекватность и достоверность вероятностной модели динамической прочности (25).

Формула (26) использована для расчета номограммы динамической прочности высушенных окатышей (табл. 6) в зависимости от высоты падения (продолжительность сушки – 25 мин). Из номограммы следует, что наиболее прочные окатыши образуются при использовании связующего плотностью 1,08 г/см³.

Таблица 6

Номограмма динамической прочности высушенных окатышей, полученных с применением в качестве связующего водного раствора медного купороса с лигносульфонатом (продолжительность сушки – 25 мин)

$h, \text{ м}$		2,0			4,0		
$\gamma_L, \text{ г/см}^3$	$t_c, ^\circ\text{C}$						
	$d, \text{ м}$	120	150	180	120	150	180
1,02	0,005	1,0	1,0	1,0	0,99	1,0	1,0
	0,007	1,0	1,0	1,0	0,91	0,99	1,0
	0,009	0,98	1,0	1,0	0,32	0,92	0,99
	0,011	0,83	0,99	1,0	0	0,40	0,87
	0,013	0,13	0,86	0,98	0	0	0,23
1,04	0,005	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	0,007	1,0	1,0	1,0	0,94	1,0	1,0
	0,009	0,99	1,0	1,0	0,47	0,94	0,99
	0,011	0,88	0,99	1,0	0	0,55	0,92
	0,013	0,27	0,90	0,99	0	0	0,39
1,06	0,005	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	0,007	1,0	1,0	1,0	0,95	1,0	1,0
	0,009	0,99	1,0	1,0	0,53	0,95	0,99
	0,011	0,90	0,99	1,0	0	0,61	0,93
	0,013	0,33	0,92	0,99	0	0,05	0,45
1,08	0,005	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	0,007	1,0	1,0	1,0	0,96	1,0	1,0
	0,009	0,99	1,0	1,0	0,58	0,96	0,99
	0,011	0,92	0,99	1,0	0	0,65	0,94
	0,013	0,38	0,93	0,99	0	0,01	0,50
1,09	0,005	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	0,007	1,0	1,0	1,0	0,92	0,99	1,0
	0,009	0,98	1,0	1,0	0,36	0,93	0,99
	0,011	0,85	0,99	1,0	0	0,45	0,89
	0,013	0,17	0,87	0,98	0	0	0,28

Анализ расчетных данных, представленных в табл. 7 и 8 (данные рассчитывались по вероятностным моделям (16) и (26)), показывает, что динамическая прочность окатышей ($\gamma_L = 1,08 \text{ г/см}^3$) при сбрасывании с определенной высоты, полученных с использованием в качестве связующего водного раствора медного купороса с лигносульфонатом, оказалась чуть выше, чем у окатышей ($\gamma_L = 1,09 \text{ г/см}^3$), полученных с использованием в качестве связующего водного раствора лигносульфоната (повышение наблюдается до 8 м).

Таблица 7

Показатели динамической прочности (P_y) для окатышей, полученных с применением в качестве связующего водного раствора лигносульфоната

Условия получения окатышей	$d, \text{ м}$	$h, \text{ м}$			
		2,0	4,0	6,0	8,0
$\gamma_L = 1,09 \text{ г/см}^3$, $t_C = 180^\circ\text{C}$, $\tau_C = 20 \text{ мин}$	0,005	1,0	1,0	1,0	1,0
	0,007	1,0	1,0	1,0	0,97
	0,009	1,0	0,99	0,94	0,70
	0,011	1,0	0,93	0,46	0,01
	0,013	0,99	0,39	0	0

Таблица 8

Показатели динамической прочности (P_y) для окатышей, полученных с применением в качестве связующего водного раствора медного купороса с лигносульфонатом

Условия получения окатышей	$d, \text{ м}$	$h, \text{ м}$			
		2,0	4,0	6,0	8,0
$\gamma_L = 1,08 \text{ г/см}^3$, $t_C = 180^\circ\text{C}$, $\tau_C = 25 \text{ мин}$	0,005	1,0	1,0	1,0	1,0
	0,007	1,0	1,0	0,99	0,97
	0,009	1,0	0,99	0,93	0,67
	0,011	1,0	0,94	0,48	0,02
	0,013	0,99	0,50	0	0
$\gamma_L = 1,04 \text{ г/см}^3$, $t_C = 180^\circ\text{C}$, $\tau_C = 25 \text{ мин}$	0,005	1,0	1,0	1,0	1,0
	0,007	1,0	1,0	0,99	0,96
	0,009	1,0	0,99	0,91	0,58
	0,011	1,0	0,92	0,37	0
	0,013	0,99	0,39	0	0

Динамическая прочность окатышей ($\gamma_L = 1,04 \text{ г/см}^3$), полученных с использованием в качестве связующего водного раствора медного купороса с лигносульфонатом, практически равна динамической прочности окатышей ($\gamma_L = 1,09 \text{ г/см}^3$), полученных с использованием в качестве связующего водного раствора лигносульфоната (равенство наблюдается до 6 м). Полученные данные свидетельствуют о том, что добавка медного купороса к раствору лигносульфоната позволит снизить плотность связующего с 1,09 до 1,04 г/см³. В этом случае экономия по твердому лигносульфонату составит 137 г на 1 дм³ связующего. Таким образом, подтверждается целесообразность использования медного купороса при грануляции медного концентрата, ранее показанная в работе [1].

Список литературы

1. Катренов Б. Б., Жумашев К. Ж. О возможности использования медного купороса при грануляции медного концентрата // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. №2 (38). С. 7-11.
2. Малышев В.П., Телешев К.Д., Нурмагамбетова А.М. Разрушаемость и сохранность конгломератов. Алматы: НИЦ Ғылым, 2003. 336 с.
3. Вероятностные модели статической и динамической прочности окискованных материалов / Малышев В.П., Нурмагамбетова А.М., Телешев К.Д., Лариков В.А. // Цветные металлы. 2003. №2. С. 35-39.
4. Малышев В.П. Математическое планирование металлургического и химического эксперимента. Алма-Ата: Наука, 1977. 37 с.
5. Жумашев К.Ж., Турумбетов У.А., Нарембекова А., Катренов Б.Б.

Инновационный патент Республики Казахстан №20990. Способ подготовки сульфидных концентратов меди и свинца к обжигу. Оpubл. 16.03.2009. Бюл. №3.

6. Садыков С.У. Совершенствование технологии шихтования, окатывания и аппарата для упрочняющей сушки гранулированной медной шихты полифракционного состава: дис. ... канд. техн. наук. Караганда, 2003. 148 с.

Сведения об авторах

Катренов Бауыржан Боранбаевич – мл. науч. сотрудник лаборатории «Физико–химия комплексного использования конденсированных отходов», Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева, Республика Казахстан, г.Караганда. Тел.: 8 (7212) 43-19-73. E-mail: baur-8-3@mail.ru.

Жумашев Калкаман Жумашевич – д-р техн. наук, зав. лабораторией «Физико–химия комплексного использования конденсированных отходов», Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева, Республика Казахстан, г.Караганда. Тел.: 8 (7212) 43-19-73. E-mail: innovaciya_zh@mail.ru.

Селиванов Евгений Николаевич – д-р техн. наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук (ИМЕТ УрО РАН), Россия, г.Екатеринбург. Тел.: 8(343) 267-91-24. E-mail: pcmlab@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

COPPER SULFATE IMPACT ON DYNAMIC STRENGTH OF COPPER CONCENTRATE PELLETS

Katrenov Bauyrzhan Boranbaevich – junior research fellow, Physics and Chemistry of Condensed Waste Complex Utilization laboratory, Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Karaganda, Republic of Kazakhstan. Phone: 8 (7212) 43-19-73. E-mail: baur-8-3@mail.ru.

Zhumashev Kalkaman Zhumashevich – D.Sc. (Eng.), Head of Physics and Chemistry of Condensed Waste Complex Utilization laboratory, Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Karaganda, Republic of Kazakhstan. Phone: 8 (7212) 43-19-73. E-mail: innovaciya_zh@mail.ru.

Selivanov Evgeniy Nikolaevich – D.Sc. (Eng.), Director of Metallurgy Institute, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg. Phone: (343) 267-91-24. E-mail: pcmlab@mail.ru.

Abstract. The article examines the impact of copper sulfate on indicators of dynamic strength of the dried pellets of copper concentrate. The using of copper sulfate as addition to lignosulphonate water solution, which is used as a binder in the granulation of copper concentrate, was suggested. This solution allows to reduce binder solution density from 1.09 to 1.04 g/cm³, and thus, reducing the flow-rate of lignosulphonate on granulation.

Keywords: copper concentrate pellets, pellets static strength, copper sulfate, lignosulphonate water solution.

References

1. Katrenov B.B., Zhumashev K.ZH. O vozmozhnosti ispol'zovaniya mednogo kuporosa pri granuljacii mednogo koncentrata [About use of copper vitriol in the time of pelletization of copper concentrate]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. G.I. Nosova*. [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012, no. 2 (38), pp. 7-11.
2. Malyshev V.P., Teleshev K.D., Nurmagambetova A.M. *Razrushaemost' i*

sohrannost' konglomeratov. [Preservation and destructivity of conglomerates]. Almaty: SSC «Gylym», 2003. 336 p.

3. Malyshev V.P., Nurmagambetova A.M., Teleshev K.D., Larikov V.A. Verojatnostnye modeli statičeskoj i dinamičeskoj prochnosti okuskovannyh materialov. [The probable models of static and dynamic strength of piece – made materials]. *Nonferrous metals*. 2003, no. 2, pp. 35-39.
4. Malyshev V.P. *Matematičeskoe planirovanie metallurgičeskogo i himičeskogo jeksperimenta*. [Mathematical design of metallurgical and chemical experiments]. Alma-Ata: Nauka, KazSSR, 1977, 37 p.
5. Zhumashev K. ZH., Turumbetov U.A., Narembekova A., Katrenov B.B. Innovation patent № 20990 of Republic of Kazakhstan. *The method of preparation of sulphide copper and lead concentrate to roasting process*. Published by bulletin № 3. 16.03.2009.
6. Sadykov S.U. *Sovershenstvovanie tehnologii shihtovaniya, okatyvaniya i apparata dlja uprochnjajushhej sushki granulirovannoj mednoj shihty polifrakcionnogo sostava: dis. ... kand. tehn. nauk*. [Improvement of technology of charging, pelletizing and apparatus for strength drying of pelletizing copper charge of multi-fraction composition. Diss... Candidate of technical sciences]. Karaganda, 2003. 148 p.

УДК 519.711.3

Кабаков Д.Ю., Самохвалов С.Е., Пиптюк В.П., Филатова О.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОПЕРЕНОСА РАСПЛАВА СТАЛИ ПРИ ДУГОВОМ НАГРЕВЕ НА УСТАНОВКЕ КОВШ-ПЕЧЬ

Аннотация. В статье представлена математическая модель гидродинамики и теплопереноса расплава стали. Главным усовершенствованием модели является учет сжимаемости рассматриваемой газожидкостной среды. Приведена визуализация результатов, полученных в программах, реализованных по этой модели, на языке C++.

Ключевые слова: газожидкостная среда, гидродинамика, теплоперенос, математическое моделирование, дуговой нагрев.

При производстве высококачественной стали значительное место отводится её обработке на установках ковш-печь (УКП). К числу основных процессов, осуществляемых на УКП, относят рафинирование и доводку расплава по составу и температуре. Эти процессы происходят при постоянном перемешивании

жидкой ванны за счёт продувки инертным газом, её дугового подогрева. Ввиду высокой температуры и агрессивности расплава, а также из-за сложности физического моделирования этих процессов появляются все основания для использования методов математического моделирования.

Математическая модель теплообмена и гидродинамики в газожидкостной среде типа расплава-газ, построенная в рамках концепции взаимодействующих и взаимопроникающих континуумов по методике, описанной в [1], и является модификацией, представленной в [2-4] модели, которая учитывает сжимаемость моделируемой среды, а также дуговой подогрев, осуществляемый на УКП.

Динамика газожидкостной среды описывается системой уравнений Навье-Стокса для сжимаемой среды:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = R(\vec{v}, \alpha) - \vec{\nabla} \tilde{p}, \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = \Phi(\vec{v}, \alpha), \quad (2)$$

уравнением переноса газовой фазы

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{v}) + \vec{\nabla} \cdot [D_e \vec{\nabla} \alpha] + \Phi(\vec{v}, \alpha) \quad (3)$$

и уравнением переноса тепла

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{v} \vec{\nabla} T + \vec{\nabla} \cdot [a_e (1 - \frac{3}{2} \alpha) \vec{\nabla} T] / (1 - \alpha) + \psi_T, \quad (4)$$

где $\vec{v}$ – барицентрическая скорость газожидкостной среды; α – коэффициент объемного содержания газа; $\tilde{p}$ – динамическая составляющая давления, поделенная на плотность металла ρ_0 ; T – температура среды; t – время; a_e – коэффициент эффективной теплопроводности; D_e – коэффициент эффективной турбулентной диффузии газовой фазы; ψ_T – тепло, поступающее от источника в единицу времени.

Введенные для удобства функции $R(\vec{v}, \alpha)$ и $\Phi(\vec{v}, \alpha)$ имеют следующий вид:

$$R(\vec{v}, \alpha) = -(\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} + \vec{\nabla} (v_e \vec{\nabla} \cdot \vec{v}) + \alpha \vec{g}, \quad (5)$$

$$\Phi(\vec{v}, \alpha) = \psi_\alpha - \frac{\alpha \rho_0}{\gamma p} \vec{g} \cdot (\vec{v} + \vec{w}) - \vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{w}), \quad (6)$$

где v_e – эффективный коэффициент кинематической вязкости; $\vec{g}$ – ускорение свободного падения; ψ_α – объемный источник газовой фазы; $\vec{w}$ – диффузионная скорость газовой фазы; γ – показатель адиабаты; p – давление.

Упомянутые выше уравнения являются следствиями законов сохранения, а именно: (1) – импульса, (3) – массы, (4) – энергии. Уравнение (2) служит для согласования полей скоростей и давления и называется уравнением непрерывности.

Для решения уравнений (1)–(4) воспользуемся модифицированным методом расщепления по физическим факторам для сжимаемых сред [1]:

I этап

$$\vec{\tilde{v}} = \vec{v}^n + \tau R(\vec{v}^n, \alpha^n); \quad (7)$$

II этап

$$\alpha^{n+1,k+1} = \alpha^n + \tau \left[-\vec{\nabla} \cdot (\alpha^{n+1,k} \vec{v}^{n+1,k}) + \vec{\nabla} \cdot (D_e \vec{\nabla} \alpha^{n+1,k}) + \Phi(\vec{v}^{n+1,k}, \alpha^{n+1,k}) \right], \quad (9)$$

$$\Delta \tilde{p}^{n+1,k+1} = \left[\vec{\nabla} \cdot \vec{\tilde{v}} - \Phi(\vec{v}^{n+1,k}, \alpha^{n+1,k}) \right] / \tau, \quad (8)$$

$$\vec{v}^{n+1,k+1} = \vec{\tilde{v}} - \tau \vec{\nabla} \tilde{p}^{n+1,k+1}; \quad (10)$$

III этап

$$T^{n+1} = T^n + \tau \times \left\{ -\vec{v}^{n+1} \vec{\nabla} T^n + \vec{\nabla} \cdot \left[a_e \left(1 - \frac{3}{2} \alpha^{n+1} \right) \vec{\nabla} T^n \right] / (1 - \alpha^{n+1}) + \psi_T \right\}, \quad (11)$$

где τ – шаг по времени; первый верхний индекс – номер временного слоя, второй верхний индекс – номер итерации.

На первом этапе находится поле промежуточных скоростей $\vec{\tilde{v}}$, без учета давления. На втором этапе при помощи неявной схемы методом итераций находятся поля давления, истинные скорости среды и распределение газовой фазы в следующий момент времени. На третьем этапе с учетом найденных скоростей и распределения газа по явной разностной схеме находим поле температур среды. Уравнение (8) получено благодаря подстановке (7) в (1) и применению оператора набла, после чего учтено (2). Оно является уравнением Пуассона и для его решения оно было заменено соответствующим эволюционным аналогом:

$$p^{n+1,k+1} = p^{n+1,k} + \omega \times \left\{ \Delta \tilde{p}^{n+1,k} - \left[\vec{\nabla} \cdot \vec{\tilde{v}} - \Phi(\vec{v}^{n+1,k}, \alpha^{n+1,k}) \right] / \tau \right\}, \quad (12)$$

где ω – эволюционный параметр, который обеспечивает сходимость эволюционного процесса.

За расчетную область берем усеченный конус. Учитывая трехмерную конфигурацию граничных условий, задачу необходимо решать в трехмерной постановке. Конечно-разностные аналоги уравнений (7) – (11) были расписаны на трехмерной шахматной сетке в цилиндрических координатах (r, ϕ, z) , которая окаймлена слоем заграничных ячеек. Скалярные величины (содержание газа, температура, давление) задаются в центрах ячеек, а векторные (скорость) – на гранях.

Граничные условия для скоростей. Для параллельных составляющих скоростей выставляем условие частичного прилипания на твердых поверхностях и условие свободного скольжения на оси симметрии, для перпендикулярных составляющих – условие непротекания, на свободной поверхности – условие свободного протекания.

Граничные условия для коэффициента содержания газа. На твердых поверхностях и оси симметрии примем условие непротекания, а на свободной поверхности – условие свободного протекания.

Граничные условия для теплообмена. На стенках, свободной поверхности и днище задаются условия эффективной конвективной теплоотдачи.

Необходимо также отметить, что при расстановке граничных условий важно обеспечить условие сопряжения всех характеристик среды при $\phi = 0^\circ$ и $\phi = 360^\circ$. Для этого были созданы дополнительные ячейки в начале и в конце слоев по углу с номерами 0 и MJ+1, куда «транслируются» все величины соответственно с MJ-го и 1-го слоев, где MJ – количество ячеек по углу.

Подача газа через фурмы проводилась путем введения в местах их расположения источника газовой фазы объемной плотности:

$$\psi_\alpha = \frac{q}{V_k}, \quad (13)$$

где q – расход инертного газа через фурму в единицу времени, а V_k – объем зоны формирования режима барботажа (в расчетах считался равным объему расчетной ячейки).

Дуговой подогрев на установке ковш-печь осуществляется при помощи расположенных над расплавом трех симметричных электродов переменного тока. В модели учет нагрева реализован благодаря введению в местах расположения электродов источников тепла объемной плотности:

$$\psi_T = \frac{P}{3C_0\rho_0V_k}, \quad (14)$$

где P – суммарная мощность источника; C_0 – теплоемкость металла.

На практике нередко используют ковши с усилением бойной части. Принцип учета ее наличия в ковше описан в [3].

Поданная модель была реализована в пакете программ на языке C++. В пакет входит программа для проведения расчетов и программа для визуализации и анализа полученных результатов при расчетах.

Для демонстрации работы модели в этой статье выбрана установка УКП-60 (ковшовая ванна ёмкостью 60 т). Геометрические параметры ковша, параметры бойной части и теплофизические характеристики материалов приведены в [5].

Были проведены расчеты для расплава стали марки 85Г с начальной температурой 1550°C при дуговом подогреве 3-мя электродами переменного тока с суммарной мощностью 7.7 мВт с коэффициентом поглощения 0.657.

В расчетах рассмотрены 3 варианта: без продувки, продувка через одну и через 2 фурмы, расположенные на расстоянии 0.6 м от оси симметрии, интенсивность подачи газа через каждую фурму – 25 л/мин.

Все последующие результаты взяты на 100-й секунде после начала продувки и подогрева.

На рис. 1 можно увидеть изоповерхности полей распределения газа в ковше в случаях продувки через одну и две фурмы. Для подобной визуализации в разработанных программах реализован метод марширующих кубов. Тут и далее случаи *a* и *в* относятся к

расчетам без учета сжимаемости среды, *б* и *г* – с ее учетом. Главным проявлением сжимаемости среды является увеличение объема газа при его всплытии, что соответствует физической реальности: чем ближе газ к свободной поверхности, тем меньше давления на него оказывают слои металла, что находятся над ним и, соответственно, его плотность уменьшается, а объем увеличивается.

На рис. 2 представлены поля баричесентрических скоростей среды в упомянутых выше случаях. Как можно заметить,

в случае сжимаемости более распространенный по объему ковша газ приводит к более высоким скоростям. В таблице приведены средние скорости в ковше, которые подтверждают ранее сказанное.

Средние скорости в ковше, м/с

а	0.070
б	0.082
в	0.112
г	0.134

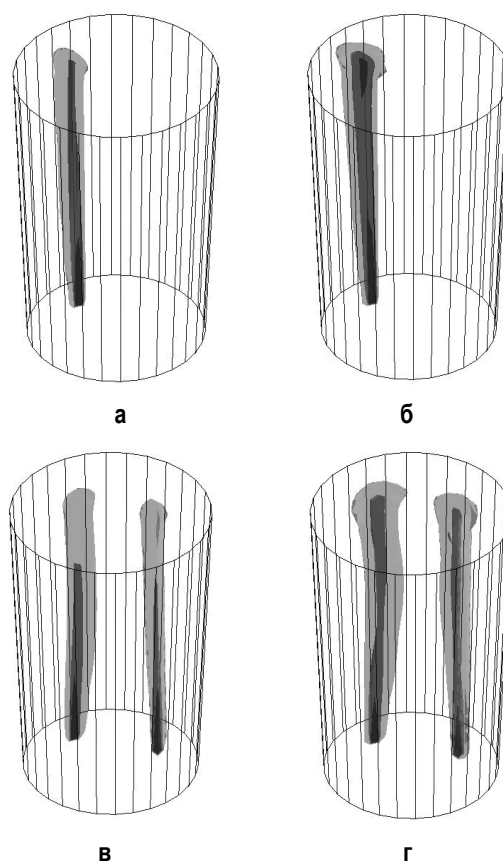


Рис. 1. Изоповерхности полей распределения газа в ковше. Уровни от светлого к темному: 1%, 5%, 10%

Приходим к выводу, что даже при столь невысокой интенсивности продувки учет сжимаемости среды заметно отражается на результатах. Поэтому далее будем рассматривать только случай со сжимаемой средой.

Рис. 3 показывает поля температур при указанных режимах продувки. Во всех трех рассматриваемых случаях средняя температура приблизительно равна 1552.4°C , что свидетельствует о соблюдении закона сохранения энергии, т.к. источники (электроды пере-

менного тока) и стоки (теплообмен с окружающей средой) во всех трех случаях одинаковы.

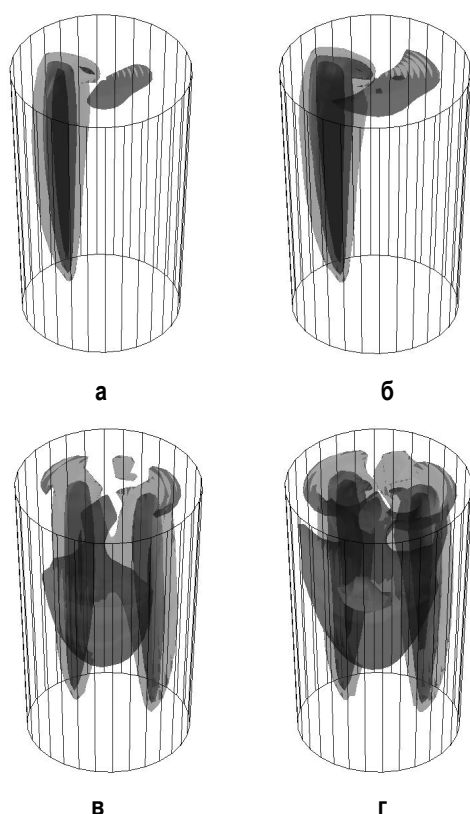


Рис. 2. Изоповерхности барицентрических скоростей.
Уровни от светлого к темному:
0.15 м/с, 0.25 м/с, 0.35 м/с

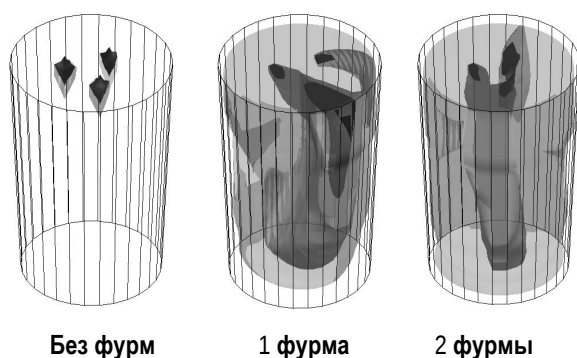


Рис. 3. Изоповерхности температур в ковше.
Уровни от светлого к темному: 1550°C, 1555°C, 1560°C

Сведения об авторах

Кабаков Даниил Юрьевич – аспирант кафедры прикладной математики Днепродзержинского государственного технического университета, Украина. E-mail: megafab@i.ua.

Самохвалов Сергей Евгеньевич – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой прикладной математики Днепродзержинского Государственного Технического Университета, Украина. E-mail: serg_samokhval@ukr.net.

Пиптюк Виталий Петрович – канд. техн. наук., старший научный сотрудник отдела физико-технических проблем металлургии стали Института черной металлургии НАН Украины. E-mail: pipytk_vp@mail.ru.

Филатова Ольга Анатольевна – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры прикладной механики и графики ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет, г. Магнитогорск. E-mail: Feleodor@mail.ru.

Также можно сделать заключение о ключевой роли конвективной составляющей переноса, т.к. в случае без продувки все тепло от электродов сосредоточено в небольшой области около них, а в случае продувки через 2 фурмы (когда потоки металла интенсивней) температура более усреднена по объему ковша, чем в случае продувки через 1 фурму.

Выводы

1. Построена математическая модель сопряженных процессов гидродинамики и теплообмена на установке ковш-печь при дуговом подогреве с учетом сжимаемости среды.
2. Модель реализована в пакете программ, с помощью которых были проведены расчеты и визуализированы представленные в статье результаты.
3. Главным усовершенствованием модели является возможность учета сжимаемости среды, и, как показано в статье, этот аспект заметно отражается на результатах.
4. Анализ полученных результатов подтверждает качественную адекватность модели. Для количественной адекватности модели необходима настройка некоторых ее параметров по экспериментальным результатам.
5. В дальнейшем планируется учет влияния электромагнитных сил на гидродинамику, возникающих от электродов при дуговом подогреве.

Список литературы

1. Самохвалов С.Є. Теплофізичні процеси в багатозафазних середовищах: теоретичні основи комп'ютерного моделювання. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 1994. 174 с.
2. Математичне моделювання спряжених процесів гідродинаміки та теплопереносу у ковші при різних режимах продування / Д.Ю. Кабаков // Вісник СевНТУ. Серія Механіка, енергетика, екологія. №133. Севастополь, 2012. С. 118-121.
3. Спряжені процеси гідродинаміки та теплопереносу у ковші під час наповнення / Д.Ю. Кабаков, С.Є. Самохвалов // Системні технології. №2 (79). Дніпропетровськ, 2012. С. 146-151.
4. Математична модель спряжених процесів гідродинаміки та теплообміну у сталерозливному ковші з посиленою бійною частиною / Д.Ю. Кабаков, В.П. Піптюк, І.М. Логозинський, О.Г. Чичерін // Вісник ХНТУ. №2 (45). Херсон, 2012. С. 160-165.
5. Основные данные для численных исследований гидродинамики ванны на установках ковш-печь переменного тока разной мощности / Пиптюк В.П., Поляков В.Ф., Логозинский И.Н. и др. // Сб. науч. тр. ИЧМ НАНУ «Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии». 2007. Вып. 14. С. 145-153.
6. Агапитов Е.Б. Энергосбережение при струйно-плазменной ковшовой обработке расплава стали // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2011. №4. С. 92-95.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

MODELLING OF HYDRODYNAMICS AND HEAT TRANSFER OF THE MELTED STEEL
IN A LADLE FURNACE WHILE ARC HEATING IS PERFORMED

Kabakov Daniel Uriyovich – a postgraduate student, Applied Mathematics department, Dniprodzerzhynsk State Technical University, Ukraine. E-mail: megafab@i.ua.

Samokhvalov Sergiy Evgenovich – D.Sc. (Eng.), professor, Head of Applied Mathematics department, Dniprodzerzhynsk State Technical University, Ukraine. E-mail: serg_samokhval@ukr.net.

Piptyk Vitaliy Petrovich – PhD (Eng.), senior research fellow, Physical Technical Problems of Steel Metallurgy department, Institute of Ferrous Metallurgy, National Academy of Sciences, Ukraine. E-mail: piptyk_vp@mail.ru.

Filatova Olga Anatoljevna – PhD (Eng.), assistant professor, Applied Mechanics and Graphics department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. E-mail: Feleodor@mail.ru.

Abstract. Mathematical model of hydrodynamics and heat transfer of steel liquid melt is presented in this article. The main improvement of the model is the compressibility accounting of examined gas-liquid ambient. Visualization of the results obtained in C++ language in programs, realized according to this model, is presented.

Keywords: gas-liquid ambient, hydrodynamics, heat transfer, mathematical modeling, arc heating.

References

1. Samokhvalov S. *Thermophysical processes in multiphase: theoretical basis of computer modeling*. Dniprodzerzhynsk: DSTU, 1994. 174 p.
2. Kabakov D. Mathematical Model of conjugate hydrodynamic and heat transfer processes in the ladle while it is blowing with different amount of gas. *Journal of the Sevastopol. Series: Mechanics, Power Engineering, Ecology*. Sevastopol, 2012, no. 133, pp. 118-121.
3. Kabakov D., Samokhvalov S. Conjugate heat transfer and hydrodynamic processes in the ladle while it is filling. *System Technologies*. Dnipropetrovsk, 2012, no. 2 (79). pp. 146-151.
4. Kabakov D., Piptyk V., Logozinsky I., Chycherin A. Mathematical model of conjugate hydrodynamic and heat transfer processes in the forge ladle with impact wall zone. *Bulletin Kherson National Technical University*. Kherson, 2012, no. 2 (45), pp. 160-165.
5. Piptyk V., Polyakov V., Logozinsky I. and others. Basic data for numerical studies of hydrodynamics of the bath on ladle furnace with AC different power. *Collection of scientific papers of Institute of Ferrous Metallurgy of National academy of sciences of Ukraine «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy»*, 2007, no. 14, pp. 145-153.
6. Agapitov E.B. Power savings at plasma ladle-furnace to processing steels. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 4, pp. 92-95.

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.746.5.047

Мошкунов В.В., Столяров А.М.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВОГО ПОРОГА ПРОНИЦАЕМОСТИ ДВУХФАЗНОЙ ЗОНЫ В НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ СЛЯБАХ ИЗ ТРУБНОЙ СТАЛИ

Аннотация. В результате проведенных экспериментов при разливке трубной стали на слывовой МНЛЗ кислородно-конвертерного цеха ОАО «ММК» уточнены значения относительного содержания жидкости в двухфазной зоне для первого порога проницаемости этой зоны.

Ключевые слова: непрерывнолитой слыв, мягкое обжятие, лунка жидкого металла, двухфазная зона, первый порог проницаемости.

Все новые слывовые МНЛЗ имеют оборудование для осуществления мягкого обжятия отливаемых заготовок. В результате мягкого обжятия непрерывнолитой заготовки на небольшую величину – максимум до 8 мм происходит сближение фронтов кристаллизации, создается гидродинамическое давление расплава, что улучшает условия подпитки расплавом локальных участков двухфазной зоны и позволяет компенсировать уменьшение объема металла при его усадке в процессе затвердевания. Результатом этого является снижение пористости и химической неоднородности осевой части слыва.

Известно [1], что наибольшая эффективность от использования мягкого обжятия достигается в том случае, если оно осуществляется на строго определенном участке, расположенном в конечной части лунки жидкого металла между двумя порогами проницаемости двухфазной зоны. Первый порог или «граница выливаемости» характеризует начало затруднения подпитки жидким расплавом двухфазной зоны. По мнению разных авторов, этот порог наступает при наличии 0,80-0,65 жидкости в двухфазной зоне заготовки. Считается, что на данную величину оказывают влияние различные факторы: химический состав разливаемой стали, скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора, интенсивность вторичного охлаждения заготовки, конструктивные особенности конкретной МНЛЗ.

В кислородно-конвертерном цехе ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» эксплуатируется слывовая МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным участком [2, 3]. Одноручьевая машина имеет базовый радиус 11 м и вертикальный участок длиной около 2,7 м. На машине могут отливаться слывовые заготовки толщиной 190, 250 и 300 мм и шириной 1400-2700 мм. Машина в зоне вторичного охлаждения (ЗВО) имеет оборудование для осуществления мягкого обжятия слыва. Выбор места осуществления мягкого обжятия на технологическом канале МНЛЗ производится на первом или втором

уровнях автоматизированной системы МНЛЗ. Данная система в динамическом режиме рассчитывает протяженность лунки жидкого металла и определяет номер сегмента ЗВО, в котором расположен конец лунки. Мягкое обжятие слыва рекомендуется производить в двух предыдущих сегментах. Для повышения эффективности мягкого обжятия его необходимо начинать на том участке слыва, внутри которого относительное содержание жидкости в двухфазной зоне соответствует первому порогу проницаемости этой зоны. С целью уточнения относительного содержания жидкости в двухфазной зоне для первого порога проницаемости было проведено исследование по специальной разработанной методике.

Согласно этой методике необходимо выполнить следующие условия: режим мягкого обжятия непрерывнолитой заготовки отключается с установлением термического конуса, соответствующего естественной усадке стали при ее затвердевании; скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора должна быть постоянной в течение 30 и 40 мин для слывов толщиной соответственно 250 и 300 мм; изменение температуры металла в промежуточном ковше не должно превышать десять градусов.

Эксперимент проводится в следующей последовательности: на технологическом канале МНЛЗ выбираются роликовые сегменты, в которых согласно расчетным данным, выдаваемым автоматизированной системой в режиме реального времени, располагается двухфазная зона слыва с относительным содержанием жидкости менее 0,80; при помощи перемещения гидроцилиндров осуществляется поочередное открытие выбранных сегментов поднятием верхней рамы на 3 мм, начиная с наиболее удаленного от кристаллизатора сегмента; производится постоянный контроль силы, развиваемой гидроцилиндрами на входе и выходе в открытых сегментах; фиксируется момент быстрого роста силы как на входе, так и на выходе из сегмента и соответствующее этому моменту расчетное содержание жидкости в двухфазной зоне слыва,

которое характеризует первый порог проницаемости двухфазной зоны.

Данные о четырех опытных плавках, проведенных после корректировки расчетных данных, выдаваемых автоматизированной системой МНЛЗ о протяженности лунки жидкого металла в непрерывнолитом слябе, представлены в **таблице**.

Данные опытных плавков

Параметр	Опытные плавки			
	1	2	3	4
Марка стали	20	20	D	09Г2С
Содержание элемента, %:				
углерод	0,163	0,164	0,10	0,08
кремний	0,285	0,280	0,26	0,71
марганец	0,436	0,524	0,91	1,58
сера	0,004	0,002	0,003	0,003
фосфор	0,012	0,014	0,008	0,010
хром	0,103	0,064	0,040	0,040
никель	0,036	0,037	0,026	0,030
медь	0,063	0,059	0,056	0,070
алюминий	0,047	0,035	0,030	0,040
титан	0,003	0,003	0,015	0,020
азот	0,004	0,005	0,005	0,005
ниобий	0,001	0,001	0,027	0,004
ванадий	0,006	0,008	0,039	0,003
кальций	0,002	0,002	0,002	0,003
водород (ppm)	2,0	2,0	2,1	2,5
Размеры поперечного сечения сляба, мм:				
толщина	250	250	250	300
ширина	2050	2050	2050	1650
Скорость вытягивания сляба из кристаллизатора, м/мин	0,9	1,0	1,0	0,8
Температура металла в промежуточном ковше, °С	1540	1537	1538	1530
Температура ликвидус стали, °С	1517	1518	1519	1514
Номера поднятых сегментов ЗВО	11, 10	12, 11	13, 12,11, 10	14,13, 12,11, 10

В качестве примера рассмотрим один из проведенных опытов. В четвертом опыте отливались слябы толщиной 300 мм из стали марки 09Г2С со скоростью 0,8 м/мин. Данный опыт отличается от предыдущих тем, что при его проведении поочередно было открыто самое большое количество сегментов ЗВО – пять, начиная с 14-го и заканчивая 10-м. Как и в предыдущих опытах, продолжительность открытия каждого сегмента и промежутки времени между закрытием предыдущего и открытием следующего сегментов были по три минуты. На **рис. 1** и **2** показаны результаты четвертого опыта.

Из анализа рисунков следует, что в 14-м и 13-м сегментах ферростатического давления расплава нет. Об этом свидетельствует стабильно низкое усилие, развиваемое гидроцилиндрами после поднятия сегментов, 100 кН – на входе и 400 кН – на выходе (см. **рис. 1**). Напротив, в 11-м и 10-м сегментах явно выражено ферростатическое давление расплава: усилия гидроцилиндров достаточно высокие, они выросли с 700-800 кН на входе в 11-й сегмент до 1000 кН на выходе и с 950 кН на входе в 10-й сегмент до 1200 кН на выходе из него.

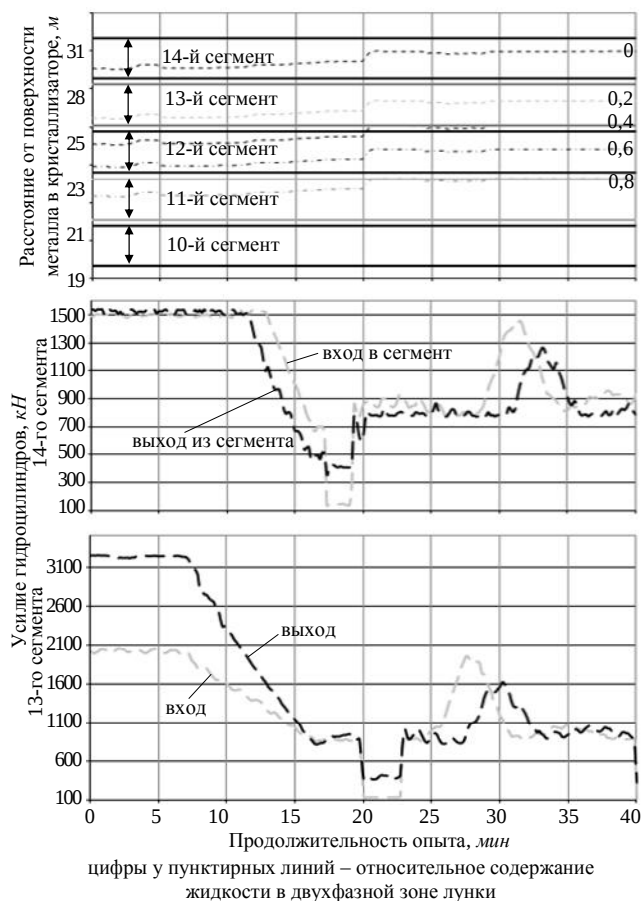


Рис. 1. Изменение усилий гидроцилиндров открытых 14-го и 13-го сегментов ЗВО и длины отлитой заготовки в четвертом опыте

При поднятии 12-го сегмента (см. **рис. 2**) сначала наблюдается кратковременный провал усилий гидроцилиндров на входе и выходе до 550 кН, а затем как на входе, так и на выходе усилия быстро увеличиваются до 800 кН на входе и 750 кН на выходе. Это говорит о развивающемся ферростатическом давлении расплава. По расположению сплошной горизонтальной линии, показывающей удаленность входа в 12-ый сегмент от поверхности жидкого металла в кристаллизаторе, относительно пунктирных линий, характеризующих двухфазную зону с относительным содержанием жидкости в двухфазной зоне 0,6 и 0,8, можно определить (показано стрелками), что на входе в 12-й сектор на 29-32 мин эксперимента

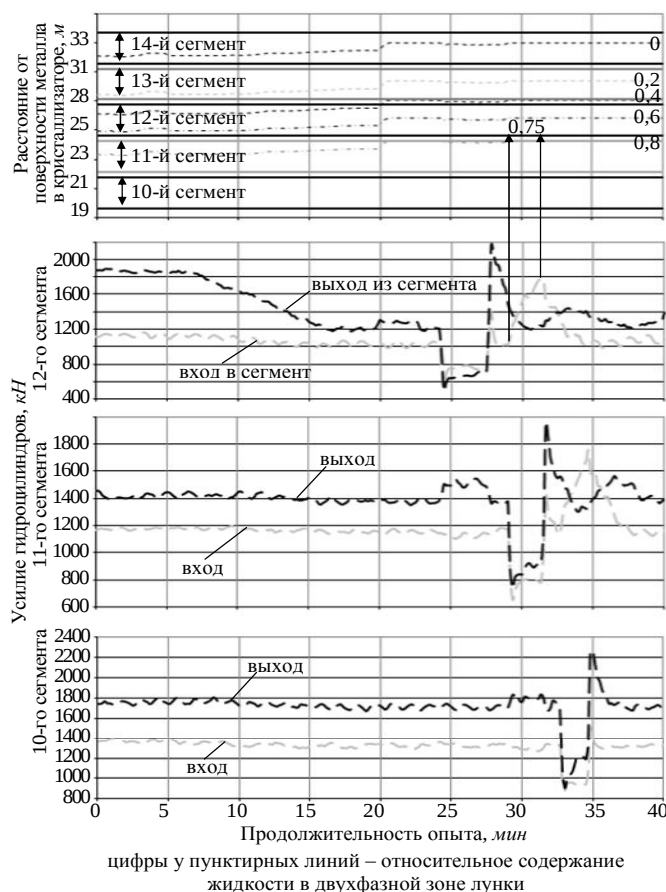


Рис. 2. Изменение усилий гидроцилиндров открытых 12-го, 11-го и 10-го сегментов и длины отлитой заготовки в четвертом опыте

Сведения об авторах

Мошкун В.В. – аспирант кафедры металлургии черных металлов ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.8(3519)29-84-49. E-mail: moshkunov@inbox.ru.

Столяров А.М. – д-р техн. наук, проф. кафедры металлургии черных металлов ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.8(3519)29-84-49. E-mail: mcm@magtu.ru.

Список литературы

1. Еланский Г.Н. Разливка и кристаллизация стали. М.: МГВМИ, 2010. С. 128.
2. Мошкун В.В., Столяров А.М., Казаков А.С. Определение длины лунки жидкого металла в непрерывнолитых слябах из трубной стали с использованием эффекта «искусственного раздутия» заготовки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. №1 (37). С. 24-26.
3. Мошкун В.В., Столяров А.М., Казаков А.С. Снижение осевой химической неоднородности трубной стали в результате мягкого обжата непрерывнолитого сляба // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. №2 (38). С. 24-25.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DETERMINATION OF THE FIRST LIMIT OF CONDUCTIVITY IN THE DOUBLE-PHASE ZONE OF PIPE-STEELS SLABS

Moshkunov Vladimir Victorovich – post-graduate student, Metallurgy of Ferrous Metals department, Nosov Magnitogorsk state technical university. Phone: 8(3519)29-84-49. E-mail: moshkunov@inbox.ru.

Stolyarov Alexander Mihajlovich – D.Sc. (Eng.), professor, Metallurgy of Ferrous Metals department, Nosov Magnitogorsk state technical university. Phone: 8(3519)29-84-49. E-mail: mcm@magtu.ru.

Abstract. Experiments resulted in pipe-steel casting in the oxygen-converter slabbing mill of OJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works» values of the relative content of liquid in the double-phase zone were clarified. These values characterized the first limit of conductivity of the pipe-steels.

Keywords: Continuously cast slab, soft reduction, solidus front, the double-phase zone, the first limit of conductivity

References

1. Elanskiy G.N. *Razlivka i kristallizatsiya stali*. [Casting and crystallization of steel]. Moscow: MSNMU, 2010, p. 128.
2. Moshkunov V.V., Stolyarov A.M., Kazakov A.S. *Opreделение длины лунки*

zhidkogo metalla v nepreryvnykh slyabakh iz trubnoj stalis ispol'zovaniem ehffekta «iskusstvennogo razdutiya» zagotovki. [Determination of the length to point of solidification in strands of Peritectic Low Alloyed steels for pipes with using "Mini whale" effect]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012, no.1 (37), pp. 24-26.

3. Moshkunov V.V., Stolyarov A.M., Kazakov A.S. *Snizhenie osevoj khimicheskoy neodnorodnosti trubnoj stali v rezul'tate myagkogo obzhatiya nepreryvno litogo slyaba*. [Longitudinal chemical inhomogeneity of continuously cast slab from tube steel improvements as a result of soft reduction]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012, no. 2 (38), pp. 24-25.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771

Дья Х., Сыгут М.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗНОСА КАЛИБРОВ В ПРОЦЕССЕ ПРОКАТКИ КРУГЛЫХ ПРУТКОВ

Аннотация. В статье рассмотрено математическое моделирование круглых прутков диаметром 14 мм из стали С45 и Х2СгNi19-11 с точки зрения влияния применяемой калибровки валков на износ калибров. Для теоретических исследований использовали компьютерную программу Forge 2008®, основанную на методе конечных элементов (МКЭ), который позволяет моделировать термомеханические процессы прокатки в трехосном состоянии деформации. К модели износа в компьютерной программе Forge 2008® применили упрощенную модель Арчарда. Благодаря использованию новой технологии уменьшилась сила давления металла на валки в модифицированных формах при прокатке прутков, что повлияло на уменьшение износа рабочих валков на 10-20%.

Ключевые слова: круглые прутки, калибровка валков, математическое моделирование, метод конечных элементов.

1. Введение

Конкуренция на рынке ставит перед производителями трудные задания в сфере обеспечения соответствующего качества изделий при одновременном снижении затрат на производство. Для удовлетворения потребностей производители вынуждены искать новые технологические решения и стремиться к снижению расходов в процессе производства. Минимализация затрат производств должна начинаться с процесса проектирования валков.

Разработанные схемы калибровки валков должны обеспечивать, кроме получения в прокатной линии готового изделия с размерами, высокую устойчивость инструмента. Правильно сконструированный и выполненный инструмент для обработки металлов давлением должен также обеспечивать хорошее качество готовых изделий при достаточно больших объемах производства и низкой его стоимости [1-3].

2. Математическая модель, используемая в компьютерной программе Forge 2008®

Для решения задач трехмерного пластического течения металла в процессе прокатки круглых прутков в калибрах использовали математическую модель, в которой механическое состояние деформированного материала описано с помощью закона Нортон-Гоффа [4-6], которое можно выразить следующим уравнением:

$$S_{ij} = 2K(T, \dot{\varepsilon}, \varepsilon)(\sqrt{3}\dot{\varepsilon})^{m-1}\dot{\varepsilon}_{ij}, \quad (1)$$

где S_{ij} – девиатор тензора напряжений; $\dot{\varepsilon}$ – интенсивность скорости деформации; $\dot{\varepsilon}_{ij}$ – тензор скорости деформации; ε – интенсивность деформации; T – температура; K – текстура, зависящая от предела текучести σ_p ; m – коэффициент; характеризующий горячую деформируемость металла ($0 < m < 1$).

В процессе обработки металлов давлением происходит износ инструмента. Наиболее распространен-

ным видом износа в этих процессах является износ трением [7]. Для описания такого вида износа часто применяют модель Арчарда [8]. Модель предполагает, что в условиях износа трением объем материала V_z , отделенного от единичной поверхности инструмента, прямо пропорционален нормальным напряжениям σ_n , действующим на поверхность инструмента и пути трения L_t и обратнопропорционален твердости материала H , подверженному износу (в этом случае твердости инструмента). Эту модель можно представить в виде

$$V_z = k_{zuz} \frac{\sigma_n L_t}{H}, \quad (2)$$

где $k_{изн}$ – коэффициент износа.

Уравнение (2) для решения с помощью алгоритма, основанного на МКЭ, может быть представлено в интегральном виде:

$$V_z = k_{zuz} \int_0^t \frac{\sigma_n \cdot v_s}{H(T)} dt, \quad (3)$$

где v_s – статическая скорость проскальзывания металла по поверхности инструмента; t – время; $H(T)$ – твердость инструмента при заданной температуре.

Параметры σ_n , v_s и T являются переменными во времени в процессе пластической обработки металлов давлением для каждой точки на поверхности инструмента. Эти параметры были определены с помощью трехмерной математической модели, основанной на методе конечных элементов, в котором механическое состояние деформируемого металла описано с помощью закона Нортон-Гоффа [4, 9].

Чтобы решить уравнение (3), следует знать величину коэффициента износа k_{zuz} и твердость инструмента H . Для описания твердости инструмента H необходимо принять коэффициент, описывающий влияние его температуры на твердость. Поэтому точный количественный анализ износа инструмента возможен только после получения соответствующих эм-

пирических данных и определения эмпирических коэффициентов уравнения (3).

Пренебрежение влиянием коэффициента износа $k_{из}$ и влияние температуры на твердость инструмента позволит использовать уравнение (3) только в сравнительных целях. Поэтому в модели, применяемой в программе 2008®, уравнение (3) упрощено до вида

$$W = \int_0^t \sigma_n \cdot v_s dt. \quad (4)$$

Поскольку напряжение трения τ_j является произведением нормального напряжения σ_n и коэффициента трения μ , то интеграл $\int_0^t \sigma_n \cdot v_s dt$ имеет физический смысл и равен единице работы силы трения на единицу поверхности стыка металла с инструментом.

Модель износа, представленная в компьютерной программе Forge2008®, не позволяет принять во внимание изменения температуры в инструменте и определить взаимные свойства контактных поверхностей деформируемого металла и инструмента [10]. Однако эту модель можно использовать для сравнительных целей, например, если при моделировании тех же процессов введем модификацию инструмента, разработанная модель позволяет получить ответ, какой инструмент будет более выносливым.

3. Материал и методика исследований

Для математического моделирования процесса прокатки круглых прутков диаметром 14 мм из заготовки диаметром 22 мм в четырех чистовых проходах приняты две схемы калибровки валков. На рис. 1 представлены форма и размеры калибров, применяемых в процессе прокатки. Вариант I представляет классические калибры, форма и размеры которых разработаны согласно общим принципам конструкции калибров для прокатки круглых прутков в системе овал-горизонтальный овал-овал-круг. В варианте II в овальные калибры 16, 26 и 36 (см. рис. 1) введены модификации формы и определены конструктивным способом новые размеры калибров. При проектировании формы модифицированных калибров использовано подобие площадей поверхности модифицированных калибров с площадями поверхности классических калибров [11]. Чистовой калибр – круглый (см. рис. 1) в двух случаях имел одинаковую конструкцию. Для получения прутков с повышенной точностью размеров калибр выполнен с наклоном к боковой стенке [2, 12].

Материалами для исследований были стали марки С45 и Х2СrNi19-11 согласно нормам PN-EN 10083-2:1999

и PN-EN 10088-1:2005. Химический состав исследуемых сталей представлен в таблице.

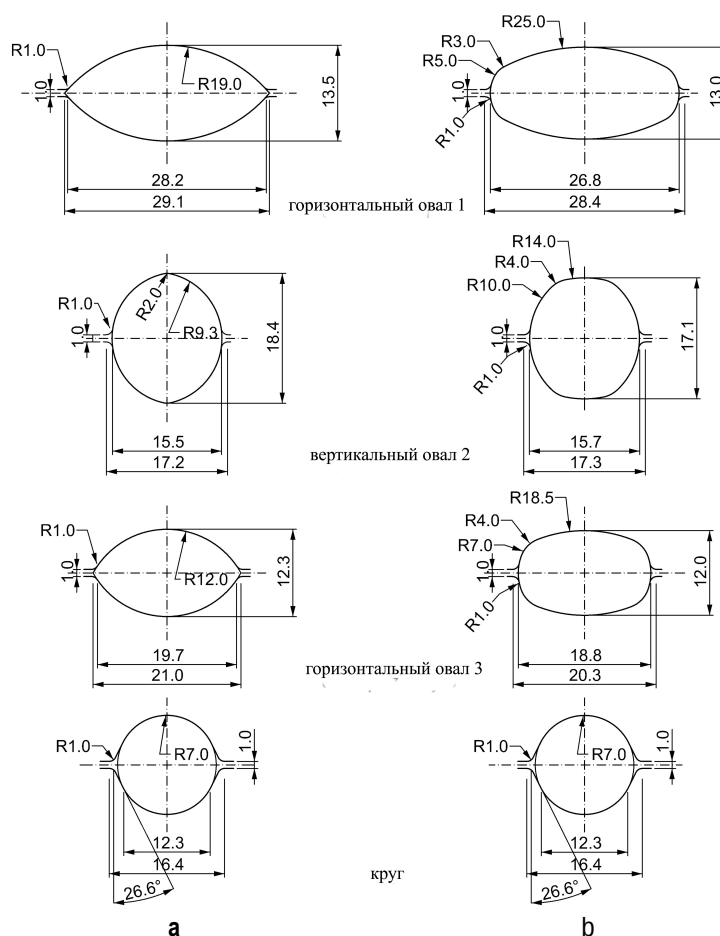


Рис. 1. Форма и размеры калибров, используемых при прокатке: а – вариант I – классический калибр; б – вариант II – модифицированный калибр [11]

Для теоретического анализа прокатки круглых прутков были приняты следующие начальные условия: диаметр валков $D = 150$ мм, температура прокатываемой полосы принята однородной во всем объеме и равна 1000°C (сталь С45) и 1050°C (сталь Х2СrNi19-11), скорость прокатки равна $0,2$ м/с, температура валков $T_w = 25^\circ\text{C}$; температура окружающей среды $T_{оточ} = 20^\circ\text{C}$; коэффициент контактной проводимости тепла между валками и полосой $\alpha = 3000$ Вт/м²К; коэффициент потери тепла в окружающую среду $\alpha_{пов} = 100$ Вт/м²К; коэффициент теплопроводности $35,5$ Вт/(м·К); удельная теплоемкость 778 Дж/(кг·К); плотность стали 7850 кг/м³; излучательная способность $0,88$ [13-15].

Химический состав сталей, принятых для математического моделирования, %

Марка стали	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Al	Cu	Sn
C45	0,45	0,64	0,21	0,015	0,031	0,13	0,14	0,04	-	0,004	0,25	0,015
X2CrNi19-11	0,03	2,00	0,24	0,045	0,03	19,0	11,0	0,75	0,10	-	-	-

4. Анализ износа калибров в процессе прокатки круглых прутков

Износ калибров в процессе прокатки влияет на увеличение отклонения размеров готового изделия. Одним из важнейших факторов, влияющих на износ калибров во время процесса деформации металла, является скольжение между металлом и инструментом. На поверхности контакта металла с инструментом существуют переменные скорости скольжения [16, 17], влияющие на механизм трения. На рис. 2 и 3 представлены результаты математического моделирования скорости скольжения металла (v_s) на поверхности контакта металла с валком с определенными зонами запаздывания и опережения.

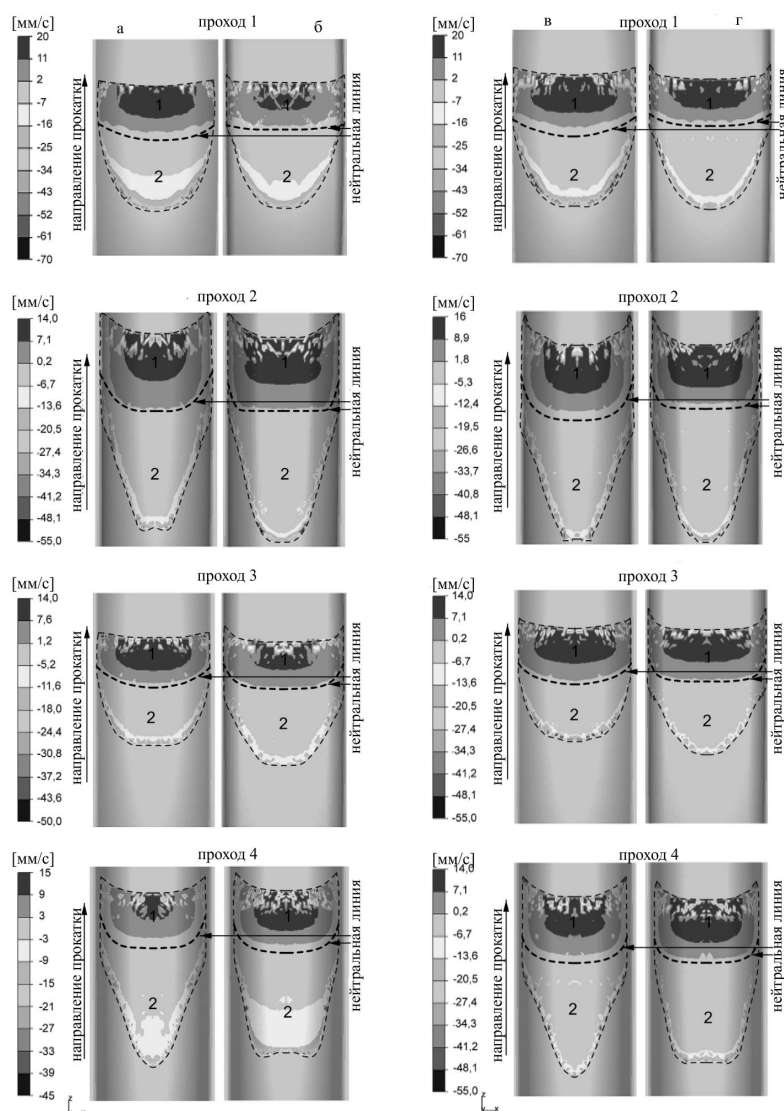


Рис. 2. Распределение скорости проскальзывания v_s на поверхности стыка металла с валком в процессе прокатки круглых прутков диаметром 14 мм в: а – классических калибрах (вариант I), сталь С45; б – модифицированных калибрах (вариант II), сталь С45; в – классических калибрах (вариант I), сталь X2CrNi19-11; г – модифицированных калибрах (вариант II), сталь X2CrNi19-11; 1 – зона опережения; 2 – зона запаздывания

Анализируя представленные на рис. 2 распределения скорости скольжения v_s на поверхности контакта металла с валком, можно сказать, что для зон запаздывания скорость пластического течения металла была меньше горизонтальной окружной скорости валков v_{wz} в среднем на 45-70 мм/с (в каждом проходе), независимо от применяемого типа калибров. Сравнивая формы и области распределения скорости скольжения v_s в зонах запаздывания, можно сказать, что анализированные величины могут влиять на более неравномерный износ классических калибров на их дне (проходы 2 и 4, рис. 2). В зоне опережения скорость скольжения на поверхности контакта металла с валком в проходах 1-3 согласно варианту II. Только при прокатке в проходе 4 при варианте II на

поверхности стыка металла с валком скорости скольжения большие, т.к. полоса, введенная в чистовой калибр, имеет большее поперечное сечение, а значит, больший коэффициент удлинения.

На рис. 3 и 4 представлено распределение единицы работы силы трения по ширине калибра в процессе прокатки круглых прутков по вариантам I и II.

Во время прокатки круглых прутков в проходах 1-3 в модифицированных калибрах (вариант II) распределение единицы силы трения для исследуемых марок стали более равномерно по ширине калибров, по сравнению с прокаткой в классических калибрах (вариант I). Резкий рост единицы работы силы трения по ширине калибра на его дне, даже до 100%, наблюдается в процессе прокатки в классических калибрах в проходах 1-3 (рис. 3, а и 4, а), что может спровоцировать больший износ калибров в местах больших значений анализируемой величины. В случае прокатки в последней клетке получены меньшие значения единицы работы сил трения по ширине калибра, в среднем на 10%, для процесса прокатки по варианту II (рис. 3, б и 4, б). В процессе прокатки полосы в чистовом калибре по варианту I износ валков на дне калибра больший, поскольку в момент захвата полосы валком в круглом калибре контакт полосы с валками происходит только в одном пункте. В момент захвата полосы валком в чистовом калибре в процессе прокатки валка согласно варианту II происходит увеличение длины контакта полосы с валками в плоскости входа в очаг деформации, что обеспечивает более равномерный и меньший износ калибра.

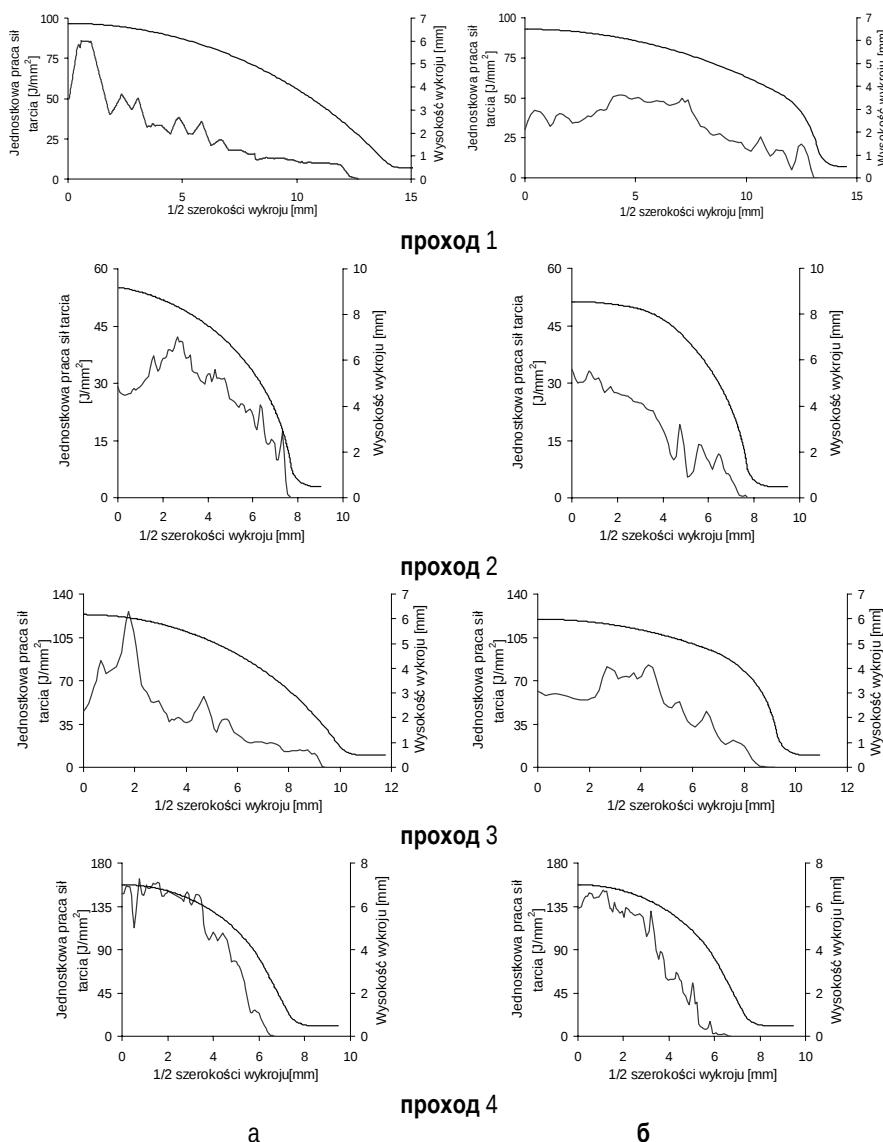


Рис. 3. Распределение единичной работы сил трения по ширине формы в процессе прокатки круглых прутков из стали С45 в: а – классических калибрах (вариант I); б – модифицированных калибрах (вариант II)

На основании полученных результатов математического моделирования можно сделать вывод о том, что благодаря применению модифицированных калибров произошло значительное уменьшение их износа по сравнению с износом классических калибров.

Модель износа, применяемая в компьютерной программе Forge2008®, позволяет дать качественную оценку износа валков, но не количественную. С целью использования результатов математического моделирования с применением упрощенной модели Арчарда для количественной оценки износа валков необходимо определение коэффициента износа и твердости инструмента в функции температуры.

В работах [18, 19] представлена методика определения количественного износа инструмента на основании результатов математических расчетов единицы работы сил трения, полученных с помощью программы Forge2008®.

С целью количественного определения износа инструмента уравнение (3) следует представить в виде

$$V_z = \frac{k_{zuz}}{HV} \int_0^t \sigma_n v_s dt, \quad (5)$$

где HV – твердость по Виккерсу.

Принимая, что в процессе прокатки твердость валков не зависит от их температуры (твердость инструмента в области температур 20-100°C может незначительно изменяться), то выражение $H(T)$ в уравнении (3) можно вынести за знак интеграла. После вынесения выражения $H(T)$ за знак интеграла подинтегральное выражение будет определять единицу работы силы трения. В исследованиях принята твердость стальных валков 400 HV. Такая твердость была принята на основании технической характеристики валков, предоставленной производителем.

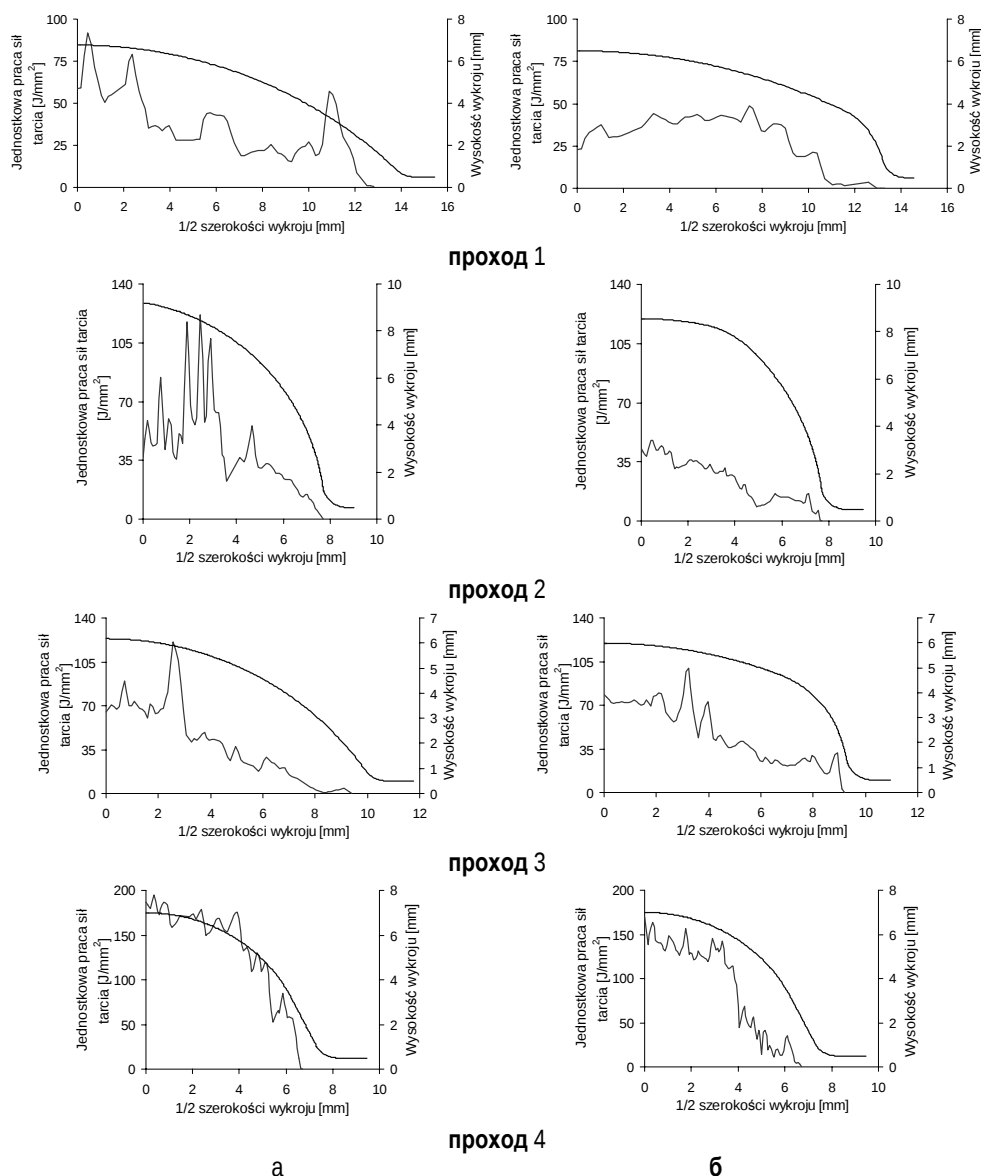


Рис. 4. Распределение единичной работы силы трения по ширине формы в процессе прокатки круглых прутков из стали С45 в: а – классических калибрах (вариант I); б – модифицированных калибрах (вариант II)

В уравнении (5) фактором, существенно влияющим на величину износа, является коэффициент k_{zuz} . В доступной технологической литературе этот коэффициент, в зависимости от условий работы используемого инструмента, достигает значений от $0,5 \cdot 10^{-5}$ до $0,8 \cdot 10^{-7} \text{ [мм}^3 \cdot \text{мм}^{-1} \cdot \text{мм}^{-2}]$. Для определения количественного износа валков с помощью уравнения (5) коэффициент износа k_{zuz} согласно расчетам [18] был принят равным $6,74 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3 \cdot \text{мм}^{-1} \cdot \text{мм}^{-2}$. Подставляя полученные значения единицы силы трения, твердости валка и рассчитанного значения коэффициента износа валков, получены теоретические размеры калибра после прокатки 100 Мг прутков из стали С45. На рис. 5 представлены теоретические размеры калибров после прокатки полосы из стали С45 по вариантам I и II, по сравнению с размерами номинального калибра.

Определение количественного износа готовых калибров (изменения геометрии валков в процессе их эксплуатации) позволило определить массу конечного изделия, который соответствует допускам на размеры. Для стали С45 в процессе прокатки с применением классических калибров (вариант I) максимальная масса прокатанных изделий согласно нормам приемки товара была равна 100 Мг, а для процесса прокатки с применением модифицированных калибров (вариант II) была равной 110 Мг. Для стали Х2СгNi19-11 для процесса проката в чистой клетке для варианта I масса прокатанных прутков составила 70 Мг, для варианта II – 86 Мг. На меньшую массу прокатанных прутков из стали Х2СгNi19-11 повлияло большее значение единицы силы трения по ширине калибра, которая зависит от большего значения пластических напряжений этой стали по сравнению со сталью С45 [13].

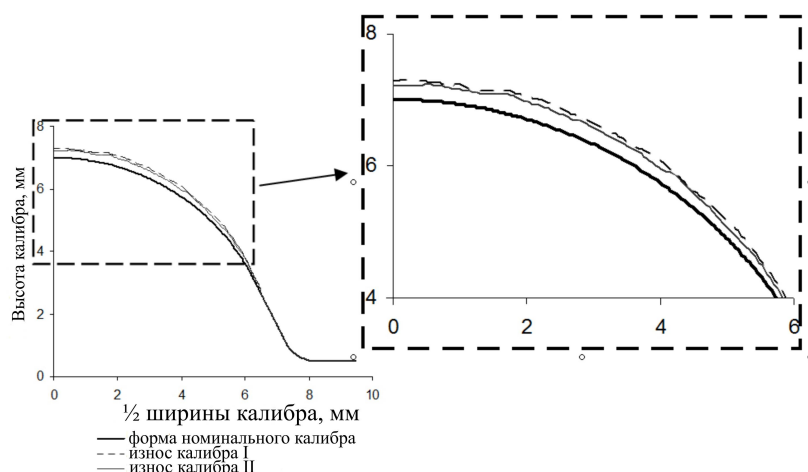


Рис. 5. Износ чистого калибра в процессе прокатки прутков из стали С45 согласно вариантам I и II

5. Заключение

В статье представлены результаты теоретических исследований процесса прокатки круглых прутков диаметром 14 мм из стали С45 и Х2СrNi19-11 с применением двух схем калибровки. На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что прокатка круглых прутков с применением модифицированных калибров влияет на уменьшение износа на 10-20% по сравнению с прокаткой в классических калибрах. Благодаря этому можно увеличить время работы валков, сократить время простоев и снизить стоимость регенерации валков. Меньший единичный износ валков в процессе прокатки в модифицированных калибрах в расчете на массу готовых изделий повлияет на снижение стоимости продукции круглых прутков в непрерывных станах.

Список литературы

1. Byon S.M., Kim S.I., Lee Y. A semi analytical model for predicting the wear contour in rod rolling process. *J. Mat. Proc. Technology*, vol. 191, 2007, pp. 306-309.
2. Danchenko V., Dyja H., Lesik L., Mashkin L., Milenin A.: *Technologia i modelowanie procesów walcowania w wykrojach*. Politechnika Częstochowska, Metalurgia, Częstochowa, 2002, no. 28.

Сведения об авторах

Дья Хенрик – д-р техн. наук, проф. кафедры обработки металлов давлением и инженерии безопасности, Факультет инженерии процессов, материалов и прикладной физики, Ченстоховский технологический университет, Польша. E-mail: dyja@wip.pcz.pl.

Сыгут Мариола – докторант кафедры обработки металлов давлением и инженерии безопасности, Факультет инженерии процессов, материалов и прикладной физики, Ченстоховский технологический университет, Польша.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

THEORETICAL ANALYSIS OF GAUGES WEAR IN ROLLING OF ROUNDS

Dyja Henryk – Full Professor, Dr.Sc., Faculty of Materials Processing Technology and Applied Physics, Institute of Modeling and Automation of Plastic Working Processing, Czestochowa University of Technology (CUT), Poland. E-mail: dyja@wip.pcz.pl.

Sygut Mariola – doktorant, Department of Production Management and Logistics, Division of Production Management, Czestochowa University of Technology (CUT), Poland.

Abstract. This paper is considered mathematical modeling of rounds 14 mm diameter made of steel C45 and X2CrNi19-11 taking into account the impact of the applied roll passes design on gauges wear. Computer program Forge 2008 ®, based on the finite element

method (FEM), which allows to simulate thermomechanical rolling processes in triaxial state of deformation, was used for theoretical studies. Archard simplified model was applied to the wear model in computer program Forge 2008 ®.

3. Mróz S., Szota P., Stefanik A.: Numeryczne modelowanie zużycia wykrojów podczas walcowania kształtownika łebkowego HP 220. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*, vol. 30, no 3, 2010, pp. 160-168.
4. Chenot J.L., Fourment L., Coupez T., Ducloux R., Wey E.: *Forging and Related Technology*. Birmingham, 1998, p. 113.
5. Hoff N.J. Approximate Analysis of Structures in the Presence of Moderately Large Steps Deformation. *Quart. Appl. Mech.*, 1954, 2, p. 49.
6. Norton F.H. *Creep of Steel at High Temperature*. McGraw Hill, New York, 1929.
7. Kocańda A. Określenie trwałości narzędzia w obróbce plastycznej metali. *Informatyka w technologii metali*, praca zbiorowa. Ed. A. Pieli, F. Grosmana, J. Kusiaka, M. Pietrzyka, Gliwice 2003, pp. 148-188.
8. Archard J. F. Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, vol. 24, no. 8, 1953, pp. 981-988.
9. Gavrus A, Massoni E, Chenot J.L. An inverse analysis using a finite element model for identification of rheological parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, vol. 60, p. 447.
10. Lesik L., Dyja H., Mróz S.: Inter-stand deformation of strip during the rolling process. *The Chinese Society for Metals CSM 2001 Annual Meeting Proceedings*, Beijing, 2001, pp. 350-354.
11. Sygut M.: Teoretyczno doświadczalna analiza procesu walcowania w modyfikowanych wykrojach wydłużających. Praca doktorska, Częstochowa, 2011.
12. Lesik L., Mróz S., Dyja H.: Wytwarzanie prętów okrągłych w zawężonym zakresie tolerancji wymiarowej. *Materiały Konferencyjne II Międzynarodowej Sesji Naukowej pt.: Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej*. Seria: Metalurgia nr 19, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2001, pp. 65-68.
13. Dyja H., Mróz S., Sygut P., Sygut M. Technologia i modelowanie procesu walcowania prętów okrągłych o zawężonej tolerancji wymiarowej. *Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej Politechniki Częstochowskiej*, Seria: Monografie, no. 27, Częstochowa, 2012.
14. Dyja H., Sygut M. Wpływ zastosowania wykrojów modyfikowanych na parametry siłowe występujące podczas walcowania prętów okrągłych. *Hutnik-Wiomości hutnicze*, 2012, no. 5, pp. 308-311.
15. Sygut M., Kawalek A., Dyja H. Ekonomiczny aspekt wykorzystania wykrojów modyfikowanych podczas walcowania prętów okrągłych. *Materiały Konferencyjne XVI Konferencji Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji*, Zakopane 2013, pp. 677-686.
16. Celikov A. I., Grishkov A. I. *Teorija prokatki*. Metallurgija, Moskva, 1970.
17. Mróz S. Proces walcowania prętów z wzdluznym rozdzieleniem pasma. *Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej*, Seria MONOGRAFIE, no. 138, Częstochowa, 2008.
18. Szota P., Mróz S., Stefanik A., Dyja H. Numerical modelling of the working rolls wear during rods rolling process. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2/2011 (vol. 56.), pp. 495-501.
19. Szota P., Mróz S., Stefanik A.: Numeryczne modelowanie zużycia ciagadel podczas ciągnięcia drutu okrągłego. *Hutnik-Wiomości hutnicze*, 2011, no. 1, pp. 138-141.

Thanks to the use of new technology, the metal pressure force on the rolls in modified moulds in rolling of rounds has decreased, that resulted in 10-20% reduction of work rolls wear-out.

Keywords: rounds, roll pass design, mathematical modeling, finite-element method.

References

20. Byon S. M., Kim S. I., Lee Y. A semi analytical model for predicting the wear contour in rod rolling process. *J. Mat. Proc. Technology*, vol. 191, 2007, pp. 306-309.
21. Danchenko V., Dya H., Lesik L., Mashkin L., Milenin A.: *Technologia i modelowanie procesów walcowania w wykrojach*. Politechnika Częstochowska, Metalurgia, Częstochowa, 2002, no. 28.
22. Mróz S., Szota P., Stefanik A.: Numeryczne modelowanie zużycia wykrojów podczas walcowania kształtownika łebkowego HP 220. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*, vol. 30, no 3, 2010, pp. 160-168.
23. Chenot J.L., Fourment L., Coupeux T., Ducloux R., Wey E.: *Forging and Related Technology*. Birmingham, 1998, p. 113.
24. Hoff N.J. Approximate Analysis of Structures in the Presence of Moderately Large Steps Deformation. *Quart. Appl. Mech.*, 1954, 2, p. 49.
25. Norton F.H. *Creep of Steel at High Temperature*. McGraw Hill, New York, 1929.
26. Kocańda A. Określenie trwałości narzędzia w obróbce plastycznej metali. *Informatyka w technologii metali*, praca zbiorowa. Ed. A. Pieli, F. Grosmana, J. Kusiaka, M. Pietrzyka, Gliwice 2003, pp. 148-188.
27. Archard J. F. Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, vol. 24, no. 8, 1953, pp. 981-988.
28. Gaurus A., Massoni E., Chenot J.L. An inverse analysis using a finite element model for identification of rheological parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, vol. 60, p. 447.
29. Lesik L., Dya H., Mróz S.: Inter-stand deformation of strip during the rolling process. *The Chinese Society for Metals CSM 2001 Annual Meeting Proceedings*, Beijing, 2001, pp. 350-354.
30. Sygut M.: Teoretyczno doświadczalna analiza procesu walcowania w modyfikowanych wykrojach wydłużających. Praca doktorska, Częstochowa, 2011.
31. Lesik L., Mróz S., Dya H.: Wytwarzanie prętów okrągłych w zawężonym zakresie tolerancji wymiarowej. *Materiały Konferencyjne II Międzynarodowej Sesji Naukowej pt.: Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej*, Seria: Metalurgia nr 19, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2001, pp. 65-68.
32. Dya H., Mróz S., Sygut P., Sygut M. *Technologia i modelowanie procesu walcowania prętów okrągłych o zawężonej tolerancji wymiarowej*, Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej Politechniki Częstochowskiej, Seria: Monografie, no. 27, Częstochowa, 2012.
33. Dya H., Sygut M. Wpływ zastosowania wykrojów modyfikowanych na parametry siłowe występujące podczas walcowania prętów okrągłych. *Hutnik-Wiadomości hutnicze*, 2012, no. 5, pp. 308-311.
34. Sygut M., Kawalek A., Dya H. Ekonomiczny aspekt wykorzystania wykrojów modyfikowanych podczas walcowania prętów okrągłych. *Materiały Konferencyjne XVI Konferencji Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji*, Zakopane 2013, pp. 677-686.
35. Celikov A. I., Grishkov A. I. *Teorija prokalki*. Metallurgija, Moskva, 1970.
36. Mróz S. Proces walcowania prętów z wzdłużnym rozdzieleniem pasma. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Seria MONOGRAFIE, no. 138, Częstochowa, 2008.
37. Szota P., Mróz S., Stefanik A., Dya H. Numerical modelling of the working rolls wear during rods rolling process. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2/2011 (vol. 56.), pp. 495-501.
38. Szota P., Mróz S., Stefanik A.: Numeryczne modelowanie zużycia ciągnadeł podczas ciągnięcia drutu okrągłego. *Hutnik-Wiadomości hutnicze*, 2011, no. 1, pp. 138-141.

УДК 621.777

Розов Ю.Г.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ВОЛОЧЕНИЯ ТРУБЧАТОЙ ЗАГОТОВКИ НА ПРОФИЛЬНОЙ ОПРАВКЕ В КОНИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ

Аннотация. Ствол стрелкового оружия требует особой тщательности при проектировании и изготовлении, в особенности при профилировании внутренней полости так называемого канала ствола. Изготовление стволов методами пластической деформации в настоящее время достаточно актуально. Однако традиционные аналитические методы анализа не позволяют получить точные расчеты основных параметров технологических процессов изготовления стволов. В данной работе представлены результаты компьютерного моделирования процесса формообразования внутренней поверхности ствольной заготовки полигонального профиля волочением в гладкой конической матрице с фиксацией (центрированием) заготовки по калибрующему пояску с помощью метода конечных элементов.

Ключевые слова: моделирование, волочение, трубчатая заготовка, профильная оправка, ствол, канал ствола, профиль,

Одной из важных задач механики деформируемого твердого тела является исследование напряженно-деформированного состояния материалов при формообразовании прецизионных трубчатых заготовок с заданным внутренним профилем.

Особое значение эти задачи приобретают в современном оружейном производстве, где в настоящее время широко используются методы пластического деформирования при изготовлении такой сложной и ответственной детали с повышенными эксплуатационными свойствами, как ствол стрелкового оружия.

Ствол стрелкового оружия – это самая важная и ответственная деталь, непосредственно в которой, за счет тепловой энергии от сгорания порохового заряда, определяются параметры внутренней баллистики: линейная и угловая скорость пули при ее движении в канале ствола, направление и начальная скорость пули в момент ее вылета из ствола. Поэтому ствол требует особой тщательности при проектировании и изготовлении.

Каналы стволов (внутренние полости стволов) по

своему строению примерно одинаковы и отличаются лишь патронником, количеством и формой нарезов, или дорожек (полигонов).

Полигональный профиль – это профиль, который в поперечном сечении ствола имеет форму одной из геометрических фигур. Наибольшее распространение получили стволы с шестиугольным профилем (рис. 1). В настоящее время применена в пистолете «Глок», пистолете-пулемете «Эльф» конструкции КБ СТ (Украина), пистолете-пулемете «Каштан» (Российская Федерация) и др.

Получить профиль ствола полигонального типа можно волочением через гладкую коническую матрицу ствольной заготовки на профильной подвижной оправке (рис. 2).

Задача определения тянущего усилия при волочении трубы на подвижной оправке решалась многими исследователями: в Германии – Е. Зибелем, А. Гелеи, в СССР – П.Т. Емельяненко, Л.Е. Альшевским, С.И. Губкиным, И.Л. Перлиным [1-3 и др.].

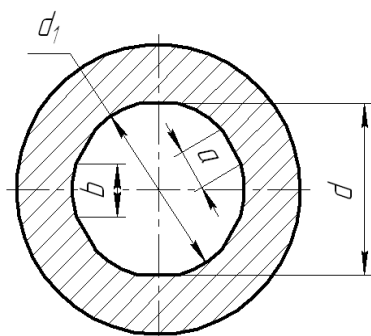


Рис. 1. Схема полигонального профиля

Полученные результаты для определения напряжения волочения отличаются по форме из-за принятых при выводе допущений, в частности различий в учете сил трения и упрощений математического характера. Следует отметить, что принимаемые при анализе допущения в одних случаях не соответствуют статическим граничным условиям, в других – геометрическим условиям (принятые в качестве главных плоскости в действительности не являются таковыми). Кроме того, ввиду принятых в приведенных работах допущений, расчеты пригодны для определения энергосиловых параметров в первом приближении и, как правило, дают завышенные на 10-20% значения усилия и работы деформации [4].

Современные компьютерные методы моделирования позволяют с высокой точностью определять энергосиловые параметры, анализировать напряженно-деформированное состояние (НДС) процесса и, самое главное, оценить точность изготовления профиля, то есть степень отклонения профиля детали от профиля оправки.

Целью работы является проведение анализа напряженно-деформированного состояния заготовок при формообразовании внутренней поверхности ствола полигонального профиля волочением на подвижной оправке в гладкой конической матрице с фиксацией (центрированием) заготовки по калибрующему пояску с использованием методов численного моделирования.

Развитие методов численного решения краевых задач математической физики с использованием возможностей современной вычислительной техники вызвало бурный рост компьютерных методов моделирования и решения упомянутых выше задач без существенных упрощений и допущений. На сегодня именно они являются основным инструментом исследования процессов и операций обработки металлов давлением, оттеснив на второй план традиционные в недалеком прошлом «аналитические» методы. Последние из них сейчас чаще всего используются на предварительной стадии создания компьютерной модели и оценки некоторых ее параметров.

Метод конечных элементов (МКЭ) – основной метод современной вычислительной математики, лежащий в основе подавляющего большинства современных программных комплексов, предназначенных для выполнения расчетов инженерных кон-

струкций на ЭВМ.

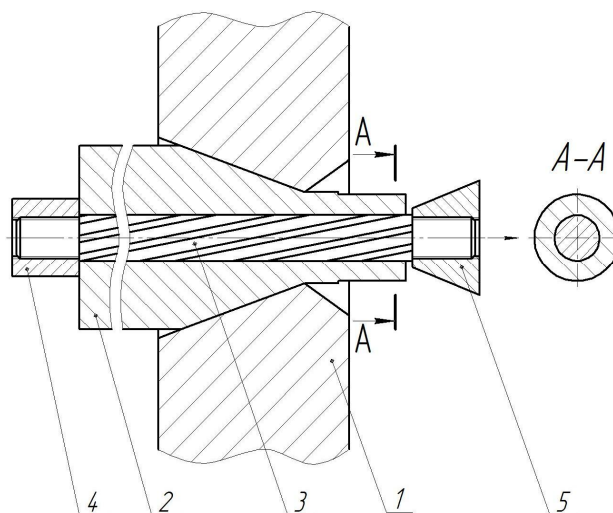


Рис. 2. Схема процесса прессования-волочения через гладкую коническую матрицу: 1 – матрица; 2 – заготовка; 3 – оправка с профилем; 4 – задний упор; 5 – захват

МКЭ позволяет практически полностью автоматизировать расчет механических систем, хотя, как правило, требует выполнения значительно большего числа вычислительных операций по сравнению с классическими методами механики деформируемого твердого тела, но вполне преодолимых, благодаря современной персональной вычислительной технике, что способствует широкому внедрению МКЭ в практику инженерных расчетов.

В данной работе эти задачи решались с помощью пакета прикладных программ DEFORM-3D, основанного на использовании метода конечных элементов (МКЭ) [5].

Были приняты следующие исходные данные:

- Материал заготовки – сталь 30ХН2МФА.
- Наружный диаметр заготовки – 16 мм.
- Внутренний диаметр – 9,02 мм.
- Площадь поперечного сечения оправки – 62,91 мм².
- Диаметр матрицы – 15 мм.
- Рабочий угол матрицы – 10 град.
- Степень деформации – 0,072.

При моделировании исходные механические свойства для стали 30ХН2МФА задавались следующими: модуль Юнга $2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона 0,3, предел текучести $\sigma_{0,2} = 490$ МПа.

Диаграмму истинных напряжений описывали, как функцию:

$$\sigma_S = \sigma_S \left(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}, T \right),$$

где σ_S – интенсивность напряжений; ε_i – интенсивность деформаций; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформаций; T – температура.

Трение учитывали на контактных поверхностях инструмента и задавали коэффициент трения $\mu=0,08$. Деформирующий инструмент принимали абсолютно жёстким.

В результате моделирования была установлена возможность получения профильной поверхности на внутренней поверхности ствольной заготовки. За счет пластической деформации, вследствие обжатия по оправке с винтообразными полигональными дорожками, формируется внутренняя поверхность канала ствола, при незначительном относительном удлинении заготовки в осевом направлении.

Компьютерным моделированием были определены параметры напряжённо-деформированного состояния в очаге деформации, использование ресурса пластичности, конечная геометрия изделия, распределение удельных усилий на поверхности контакта заготовки с инструментом, а также зависимость усилия волочения от перемещения металла в матрице (волоке).

В результате проведенного анализа определены значения основных параметров и получены следующие диаграммы:

- распределение поврежденности в объёме деформированного металла;
- распределение интенсивности деформации ε_i ;
- распределение интенсивности напряжений σ_i ;
- распределение нормальных напряжений на контактных поверхностях заготовки с инструментом;
- распределение скорости деформации;
- зависимость усилия обжатия от перемещения пуансона;
- изменение максимального расстояния между плоскостью полигона оправки и поверхностью ствольного отверстия в процессе волочения.

Расчетная зависимость усилия волочения от перемещения матрицы показана на рис. 3, при этом максимальное значение усилия процесса составило 25.7 кН.

Формирование профиля в поперечных сечениях ствольной заготовки оценивалось по изменению расстояний между плоскостью дорожки на оправке и внутренней поверхностью заготовки.

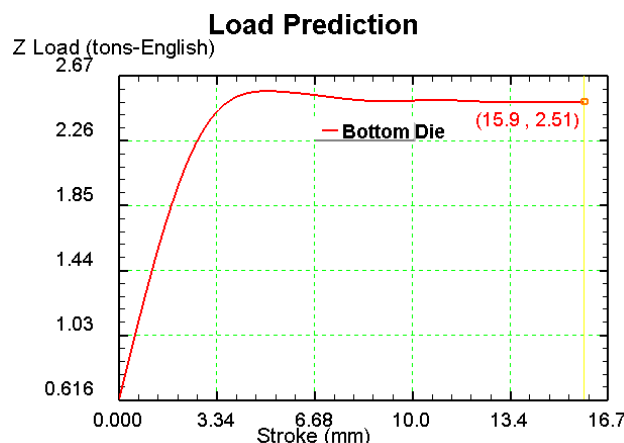


Рис. 3. Зависимость усилия обжатия от перемещения пуансона

На рис. 4, а показано исходное положение заготовки и оправки, когда расстояние между ними максимально (наибольшее расстояние в середине дорожки). По мере прохождения конического участка матрицы это расстояние уменьшается (рис. 4, б, в) и в заключении незаполненный зазор остается только у переднего конца, где находилась центрирующая проточка, а также у заднего конца, не прошедшего конический участок матрицы (рис. 4, г).

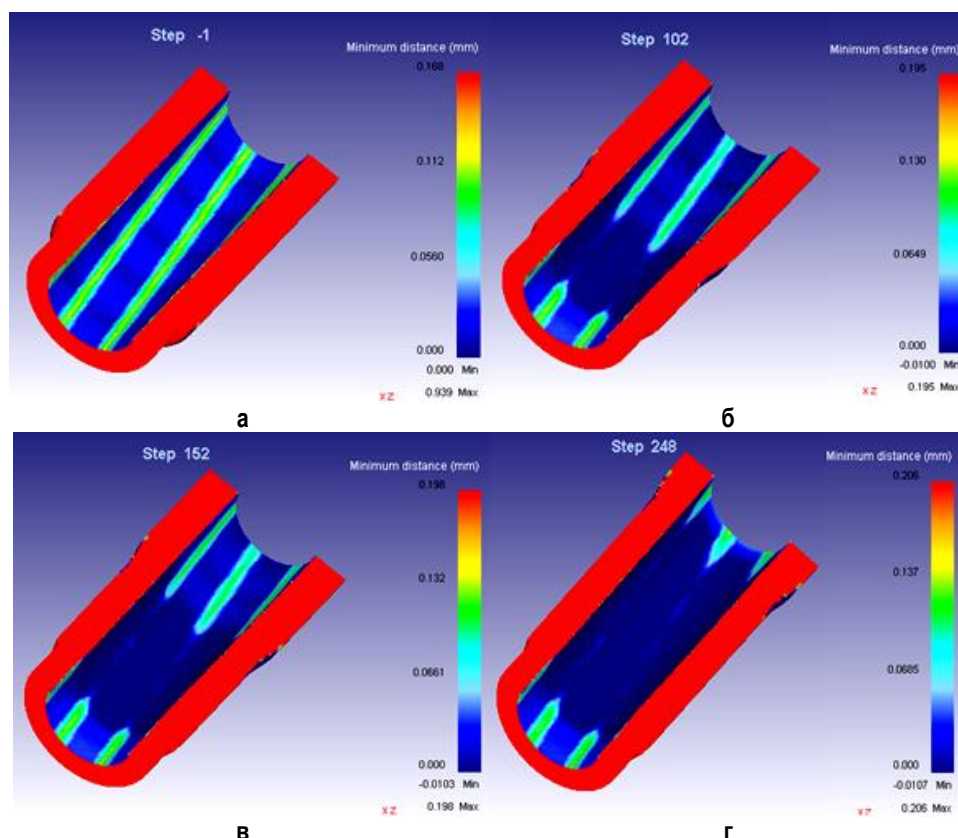


Рис. 4. Изменение максимального расстояния между плоскостью полигона оправки и поверхностью ствольного отверстия в процессе волочения: а – внешний вид заготовки до обжатия; б – заготовка после обжатия на 1/3 длины; в – заготовка после обжатия на 2/3 длины; г – заготовка после полного обжатия

Следует отметить, что указные зазоры несколько не влияют на качество полуфабриката ствола, так как в этих местах он подлежит механической обработке – у переднего конца для образования защитного от забоев углубления, а у заднего – для расточки под патронник.

Выводы

1. С целью повышения точности анализа процесса формообразования внутренней поверхности ствольной заготовки полигонального профиля волочением в гладкой конической матрице с фиксацией (центрированием) заготовки по калибрующему пояску проведение компьютерное моделирование процесса с помощью пакета прикладных программ DEFORM-3D, основанного на использовании метода конечных элементов.

Сведения об авторе

Розов Юрий Георгиевич – канд. техн. наук, доц., проректор по учебной работе Херсонского национального технического университета, Украина. Тел.: +38 (050) 494 55 66. E-mail: rozovu@mail.ru.

2. Компьютерным моделированием определены параметры НДС в очаге деформации, использование ресурса пластичности, конечная геометрия изделия, распределение удельных усилий на поверхности контакта заготовки с инструментом, а также зависимость усилия волочения от перемещения металла в матрице (волоке).

Список литературы

1. Geleji A. *Bildsame Formung der Vttalle in Rechnung und Versuch* Akademie Verlag, Berlin, 1960. 754 s.
2. Губкин С.И. *Пластическая деформация металлов*. М.: Metallurgizdat, 1961. т. III. 360 с.
3. Перлин Л.И., Ерманок М.З. *Теория волочения*. М.: Metallurgiya, 1971. 448 с.
4. Данченко В.Н., Гринкевич В.О., Головки О.М. *Теория процессов обработки металлов давлением*. Днепропетровск: Пороги, 2008. 369 с.
5. DEFORM™ 3D. Version 6.1 User's Manual Scientific Forming Technologies Corporation, 2008. 420 p.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

FINITE ELEMENT MODEL OF THE TUBULAR BLANK DRAWING ON THE SHAPED MANDREL IN THE CONICAL MATRIX

Rozov Yuriy Georgievich – PhD (Eng.), associate professor, Vice Rector for Academic Affairs, Kherson National Technical University (KNTU), Ukraine. Phone: +38 (050) 494 55 66. E-mail: rozovu@mail.ru.

Abstract. The barrel of the small arms requires great care in the design and production, especially in the internal cavity shaping so called bore. The production of barrels by means of plastic deformation is currently important. However the traditional analytical methods of analysis fail to provide accurate calculations of the critical parameters of the barrel manufacturing processes. This paper presents the computer simulation results of the forming process of the polygonal profile blank inner surface by dragging in a smooth tapered matrix release (centering) of the blank by the caliber of the girdle, using the finite element method.

Keywords: simulation, dragging, tubular blank, shaped mandrel, barrel, bore, shape.

References

1. Geleji A. *Bildsame Formung der Vttalle in Rechnung und Versuch* Akademie Verlag, Berlin, 1960. 754 s.
2. Gubkin S.I. *Plastic deformation of metals*. Moscow: Metallurgizdat, 1961, vol. III, 360 p.
3. Perlin L.I., Ermanok M.Z. *Theory drawing*. Moscow: Metallurgy, 1971, 448 p.
4. Danchenko V.N., Grinkevich V.O., Golovko O.M. *Theory of processes of metal working by pressure*. Dnepropetrovsk: Porogy, 2008, 369 p.
5. DEFORM™ 3D. Version 6.1 User's Manual Scientific Forming Technologies Corporation, 2008. 420 p.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

УДК 669.017.16:669.14.018.29

Денисов С.В., Завалищин А.Н., Кожевникова Е.В., Румянцев М.И.

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация. Изучено изменение структуры низкоуглеродистой низколегированной стали в процессе производства на различных технологических переделах. Показано, что при распределении фаз и структурных составляющих в конечной структуре горячекатаного проката существенную роль играют ликвационные явления. Последующая термическая обработка способствует повышению однородности структуры, а следовательно, улучшению механических свойств стали.

Ключевые слова: низколегированные стали, микроструктура, непрерывнолитая заготовка, контролируемая прокатка, термообработка.

На сегодняшний день активно проводятся исследования в области совершенствования производства низкоуглеродистых низколегированных сталей для строительных конструкций ответственного назначения. Непрерывный рост требований к уровню и стабильности свойств готовой металлопродукции предполагает изучение и внедрение новых химических составов сталей и металлургических технологий. Обеспечение комплекса свойств, сочетающих высокую прочность, вязкость, хладостойкость и свариваемость, а также снижение себестоимости их производства, является основной задачей при получении высококачественной низколегированной стали.

Для обеспечения требуемого уровня механических свойств и повышения работоспособности в экстремальных условиях эксплуатации необходимо в процессе листового проката формировать структуру заданной морфологии с определенным соотношением структурных составляющих. Ликвации литого металла, которые наследуются при последующей прокатке, приводят к образованию неоднородной структуры и обуславливают снижение уровня механических свойств. Концентрационные изменения вносят значительный вклад в термодинамику и кинетику фазовых превращений в сталях, влияют на температуру A_1 и A_3 , на диффузию, которая контролирует зарождение и рост карбидных частиц и формирование бейнита. В низкоуглеродистых сталях любые изменения химического состава на микроуровне вызывают изменения фазового состава и структуры, а значит, будут оказывать влияние на уровень механических свойств, в том числе по сечению проката [1].

В данной работе проведен анализ изменения структуры низкоуглеродистой низколегированной стали в процессе производства на различных технологических переделах на одних и тех же плавках от литой заготовки до готового проката с целью дальнейшего развития представлений о структурных изменениях в стали, влияния исходной на конечную структуру для возможной корректировки и регулирования технологии производства этих марок сталей.

Материал и методика исследования

Исследовали низколегированную сталь, содержащую 0,08% С, 1,6% Мп, 0,23% Si с добавками ванадия, ниобия и титана. Образцы одной и той же плавки отбирали в процессе производства непосредственно со сляба из зоны столбчатых кристаллов (образец 1) и из зоны равноосных кристаллов (образец 2); от готового проката из участков, соответствующих образцам 1, 2 на слябе, а также от термообработанного проката.

Структуру стали изучали на оптическом микроскопе Leica DM IRM 1, а также методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе JEOL JSM-6490. Травление металлографических шлифов проводили в пикриновой кислоте и в 3%-ном растворе HNO_3 .

Результаты исследования

Исходной заготовкой для производства низколегированной стали служит непрерывно литой сляб. При нагреве слябов под прокатку температурный режим выбирается таким образом, чтобы обеспечить необходимый размер первичного аустенитного зерна и растворение крупных частиц, являющихся концентраторами напряжений. Для данной стали температура нагрева лежит в интервале 1150-1200°C.

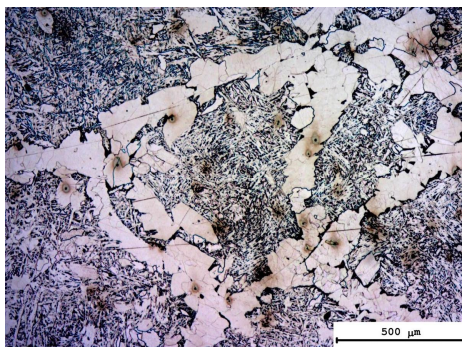
После кристаллизации в слябе различают три зоны с различной структурой. На поверхности образуется узкая зона мелких равноосных кристаллов (корка), за ней расположена зона столбчатых кристаллов в виде удлинённых дендритов, внутренняя часть сляба состоит из равноосных зерен. Структура образцов от литых слябов представлена на **рис. 1**.

При исследовании образцов в оптический микроскоп наблюдается неоднородная структура по сечению сляба; зона столбчатых кристаллов (**рис. 1, а**) представлена вытянутыми дендритами, по границам которых видны ферритные зерна, размеры которых меняются в широких пределах (от 10 до 100 мкм). Кроме того, внутри дендритов наблюдается значительное количество видманштеттового феррита и не-

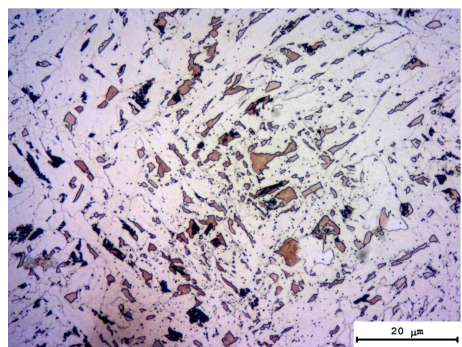
большая доля перлита. В зоне равноосных кристаллов сляба (рис. 1, б) наблюдается существенно разнотекстурированная структура. Зерна феррита на границах равноосных кристаллов несколько крупнее, доля перлита больше. Кроме того, внутри зерен присутствуют, предположительно, закалочные структуры – бейнит, малоуглеродистый мартенсит (рис. 1, в). Появление закалочных структур в центральной зоне сляба можно объяснить наличием ликвации легирующих элементов в стали.



а



б



в

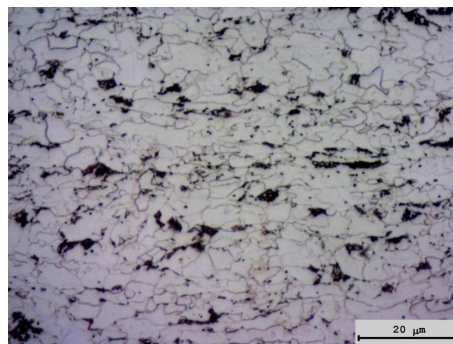
Рис. 1. Микроструктура низколегированной стали в литом состоянии: а – образец 1; б, в – образец 2

Однако исследование образцов литой стали на РСМА не показало существенной разницы в химическом составе в различных структурных составляющих ввиду недостаточной чувствительности метода.

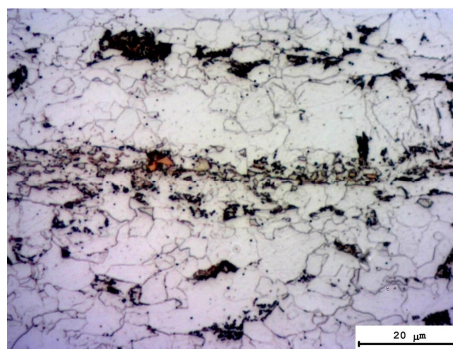
Применение контролируемой прокатки (КП) при производстве низкоуглеродистых конструкционных сталей ответственного назначения является основным

технологическим инструментом достижения заданных механических характеристик. Она включает следующие основные этапы: выбор соответствующего химического состава стали; нагрев слябов с контролируемой температурой, обеспечивающей оптимальную степень растворения карбонитридов и относительно мелкое и однородное зерно аустенитной фазы перед прокаткой; измельчение зерен аустенитной фазы за счет многократной предварительной деформации и рекристаллизации; междеформационная пауза с охлаждением до температуры рекристаллизации, финальная деформация аустенита с суммарным обжатием 50-80% при температурах ниже температуры его рекристаллизации; деформация в γ - α -области; окончательное регулируемое охлаждение после прокатки [2].

Образцы низколегированной стали после КП отбирали из участков, соответствующих образцам 1, 2 на слябе, т.е. с края и центра листа. Микроструктура горячекатаной стали (образец 1) представлена на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Структура низколегированной стали после КП (образец 1): а – поверхность; б – центральная зона листа

Сравнительный анализ образцов показал, что микроструктура в сечении листа по всей его ширине идентична и состоит из полигонального феррита и перлита. Общее количество феррита 93-95%. На поверхности листа структура достаточно однородная (рис. 2, а). В центральной зоне наблюдается допустимая полосчатость, содержащая перлит и закалочные структуры – предположительно малоуглеродистый мартенсит. Такое структурное строение по сечению полосы несколько противоречит формированию

структуры в целом при контролируемой прокатке с ускоренным охлаждением, так как динамика теплообмена в установке ламинарного охлаждения толстолистного стана горячей прокатки, в общем, предполагает интенсивное охлаждение поверхности листа и изменение скоростей охлаждения в центре за счет снижения теплоотвода из середины металла к поверхности. Таким образом, появление полос с закалочными структурами также может объясняться наличием ликваций легирующих элементов в стали. Кроме того, в данных областях наблюдаются крупные включения карбонитридов ниобия и титана (рис. 2, б), предположительно, в виде соединений NbC , Nb_2C , NbN , Nb_2N , TiC , TiN [3], что подтверждается исследованиями этих частиц методом растровой электронной микроскопии (рис. 3).

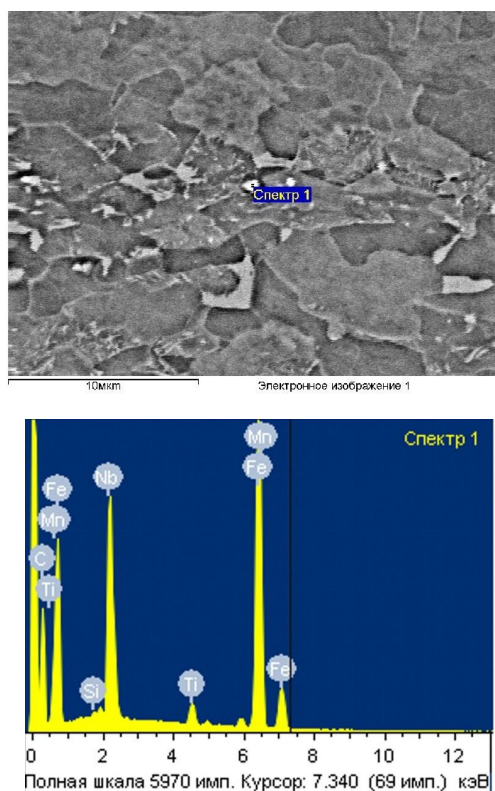


Рис. 3. Структура центральной зоны горячекатаного листа низколегированной стали (а) и рентгеновский спектр включения (б)

По установленным стандартам и техническим условиям при производстве низкоуглеродистых низколегированных конструкционных сталей ответственного назначения, а также по требованию заказчика возможно применение термообработки, в частности отпуска. Кроме того, эту технологическую операцию в некоторых случаях можно использовать для устранения несоответствий по свойствам, полученным после контролируемой прокатки. Термическая обработка позволяет повысить однородность структуры, более равномерное распределение свойств, как по сечению листа, так и вдоль него. Также применение отпуска

снимает остаточные напряжения в трубной стали, что важно для коррозионной стойкости металла.

Микроструктура низколегированной стали после отпуска (рис. 4) однородна по сечению, состоит из феррита и карбидов, выделившихся по границам ферритных зерен. В центре листа также наблюдаются слабовыраженная полосчатость и крупные включения карбонитридов ниобия и титана, что также подтверждается электронной микроскопией (рис. 5). То есть отпуск стали, повышая однородность микроструктуры, не устраняет полосчатость и крупные карбонитридные включения, оставшиеся после горячей прокатки, которые могут стать причиной зарождения трещин и расслоений металла в процессе дальнейшей эксплуатации.

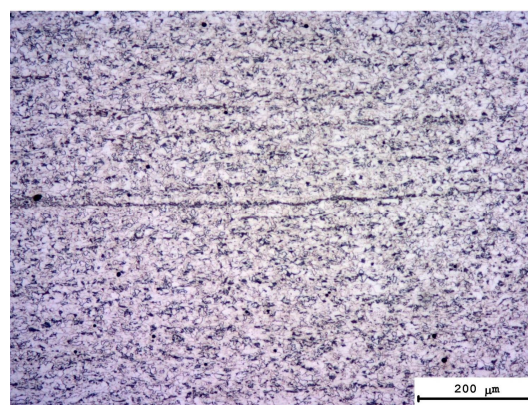


Рис. 4. Микроструктура горячекатаной низколегированной стали после отпуска

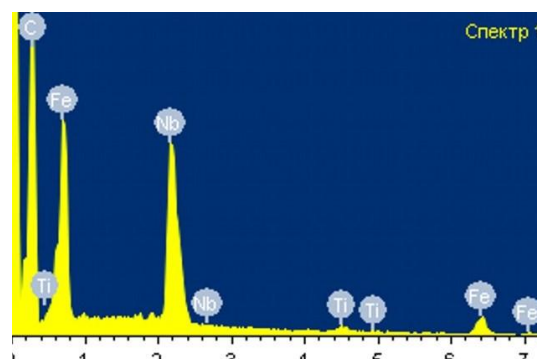
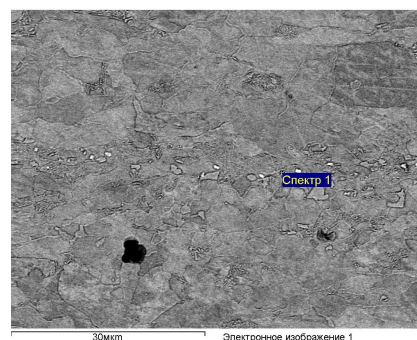


Рис. 5. Включения в горячекатаной низколегированной стали после отпуска (а) и рентгеновский спектр выделений (б)

Выводы

1. Литая структура низкоуглеродистой низколегированной стали по сечению сляба состоит из корковой зоны, зоны столбчатых кристаллов и зоны равноосных кристаллов. Зона столбчатых кристаллов представлена вытянутыми дендритами, по границам которых находятся крупные ферритные зерна, внутри дендритов наблюдается видманштеттов феррит с небольшой долей перлита. В зоне равноосных кристаллов сляба наблюдаются участки закалочных структур – бейнита, малоуглеродистого мартенсита, появление которых объясняется наличием ликваций легирующих элементов в стали.

2. Микроструктура горячекатаной низкоуглеродистой низколегированной стали по всей ширине листа состоит из полигонального феррита и перлита. В центральной зоне поперечного сечения листа наблюдается полосчатость, содержащая перлит, и закалочные структуры, а также крупные включения карбонитри-

дов ниобия и титана, что также объясняется ликвационными явлениями.

3. Отпуск не приводит к существенному изменению структуры горячекатаной структуры низколегированной стали. В центре листа наблюдаются слабовыраженные полосчатость и крупные карбонитридные включения, оставшиеся после горячей прокатки.

Список литературы

1. Особенности изменения структуры по сечению листового проката из высокопрочных штриповых сталей / Ковалев А.И., Вайнштейн Д.Л., Рашковский А.Ю., Хлусова Е.И., Орлов В.В. // *Металлург.* 2011. №1. С. 61-68.
2. Салганик В.М., Денисов С.В. Разработка и освоение технологии производства рулонного проката классов прочности X60-X70 толщиной более 12 мм для изготовления труб // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* 2008. №1. С. 81-84.
3. Денисов С.В., Завалишин А.Н., Кожевникова Е.В. Исследование карбидов в стали К60 для труб магистральных трубопроводов // *Труды восьмого конгресса прокатчиков, Магнитогорск, 11-15 октября 2010 г. Магнитогорск, 2010. Т.2. С. 539-542.*

Сведения об авторах

Денисов Сергей Владимирович – д-р техн. наук, начальник ЦЛК ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Тел.: 8(3519) 247-902.

Завалишин Александр Николаевич – д-р техн. наук, проф. кафедры материаловедения и термической обработки металлов ФГБОУ «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.: 8(3519) 298-567. E-mail: zaval1313@mail.ru.

Кожевникова Елена Васильевна – аспирантка кафедры материаловедения и термической обработки металлов ФГБОУ «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.: 8 (3519) 246-511. E-mail: ausferr_elena@bk.ru.

Румянцев Михаил Игоревич – канд. техн. наук, проф. кафедры обработки металлов давлением ФГБОУ «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.: (3519) 298-566. E-mail: mihigrum@rambler.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

CHANGE OF MICROALLOYED STEEL MICROSTRUCTURE IN MANUFACTURING PROCESSING

Denisov Sergey Vladimirovich – D.Sc. (Eng.), Director of the central laboratory of Magnitogorsk Iron & Steel Works, Magnitogorsk. Phone: 8 (3519) 247-902.

Zavalishchin Aleksandr Nikolaevich – D.Sc. (Eng.), professor, Materials and Heat Treatment of Metals department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Phone: 8 (3519) 298-567. E-mail: zaval1313@mail.ru.

Koghevnichova Elena Vasilievna – a postgraduate student, Materials and Heat Treatment of Metals department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Phone: 8 (3519) 246-511, (3519) 209-022. E-mail: ausferr_elena@bk.ru.

Rumyantsev Mihail Igorevich – Ph.D. (Eng.), professor, Metal Forming department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Phone: (3519) 298-566. E-mail: mihigrum@rambler.ru.

Abstract. Change of microstructure of microalloyed low-carbon steels in different manufacturing processes was studied. It is shown, that liquation plays an important role in phase and structural component distribution in the final structure of hot-rolled products. Subsequent heat treatment facilitates to improve the uniformity of the structure and enhance steel mechanical properties.

Keywords: microalloyed steels, microstructure, concast billet, controlled rolling, heat treatment.

References

1. Kovalev A.I., Vainshtein D.I., Rashkovsky A.Yu., Khlusova E.I., Orlov V.V. Osobennosti izmeneniya struktury po secheniyu listovogo prokata iz vysokoprochnykh shtripsovykh stalej [Features of structure changes along

section of sheet rolled product from high-strength strip steels]. *Metallurg.* 2011, no. 1. pp. 61-68.

2. Salganik V.M., Denisov S.V. Razrabotka i osvoenie tekhnologii proizvodstva rulonnogo prokata klassov prochnosti KH60-KH70 tolshhinoj bolee 12 mm dlya izgotovleniya trub [The development and implementation of technology for the production of coil stock units with X60-X70 strength and more than 12 mm thick for pipes producing]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova.* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2008, no. 1, pp. 81-84.
3. Denisov S.V., Zavalishchin A.N., Koghevnichova E.V. Issledovanie karbidov v stali K60 dlya trub magistral'nykh truboprovodov [The research of carbides in the high-strength steel K60 for pipelines]. *Proceeding of the Eighth Congress of Rollers.* Magnitogorsk, 2010, vol. 2, pp. 539-542.

УДК 621.74

Мамина Л.И., Баранов В.Н., Безруких А.И., Гильманшина Т.Р., Юрьев П.О.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СМАЧИВАЕМОСТИ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В МЕТАЛЛУРГИИ ГРАФИТОВ РАЗЛИЧНОГО КАЧЕСТВА

Аннотация. Исследованы зависимости смачиваемости кристаллического и скрытокристаллического графитов от способа их подготовки (механоактивация, окисление и окисление с последующей механоактивацией) жидкостями, получившими наибольшее применение в литейном производстве (спирт, вода, масло, глицерин). В ходе исследований определяли краевой угол смачиваемости. Для расчета остальных коэффициентов (работа адгезии, коэффициент растекания и относительная работа адгезии) использовали программу «AppSV». Отмечено, что наибольшая работа адгезии для всех исследуемых жидкостей наблюдается при смачивании графита водой, обладающей максимальным поверхностным натяжением; а наименьшая – спиртом. Показано, что смачиваемость графита всеми исследуемыми жидкостями существенно зависит от способа подготовки графита. Так, механоактивация приводит к повышению активности частиц, что способствует снижению смачиваемости графита. Окисленные графиты обладают меньшей смачиваемостью. При дополнительной механоактивации окисленного графита наблюдается дальнейшее снижение смачиваемости графитов.

Ключевые слова: кристаллический графит, скрытокристаллический графит, механоактивация, окисление, программ «AppSV», спирт, вода, масло, глицерин, краевой угол смачивания, работа адгезии, коэффициент растекания, относительная работа адгезии

К числу наиболее распространенных явлений, происходящих на границе раздела фаз твердый компонент (огнеупорный наполнитель, порошкообразные добавки) – жидкий компонент (растворитель, жидкие связующие и добавки), относится смачивание.

Смачиваемость углеродсодержащих материалов определяли методом лежащей капли. Образцы для исследований изготавливали запрессовкой под постоянным давлением. Каплю фотографировали, получившийся снимок переводили на компьютер.

Для исследований выбраны графиты различного кристаллохимического строения: скрытокристаллический графит Курейского месторождения марки ГЛС-2 и кристаллический графит марки ГЛ-1 Завальевского месторождения. С целью повышения качества природного графита были разработаны отдельные (механоактивация, окисление, обогащение) и комплексные, включающие в себя различные сочетания отдельных методов, технологии активации. Механоактивацию графита осуществляли в энергонапряженной мельнице планетарно-центрального типа АГО-2.

Для сравнительной оценки смачиваемости графитов были использованы следующие коэффициенты: краевой угол смачиваемости, работа адгезии, коэффициент растекания и относительная работа адгезии.

Краевой угол смачиваемости определяли непосредственно в ходе эксперимента. Для расчета остальных коэффициентов была использована методика, описанная в работе [1], на основе которой была разработана программа «AppSV» (рис. 1) [2].

В качестве жидкой фазы использовали жидкости, получившие наибольшее применение в литейном производстве: этиловый спирт и вода – растворители для формовочных смесей и покрытий; глицерин – как аналог жидких сплавов; растительное масло, используемое в комбинированных связующих и антифрикционных составах. В таблице приведены справочные

данные поверхностного натяжения и работы когезии исследуемых жидкостей.

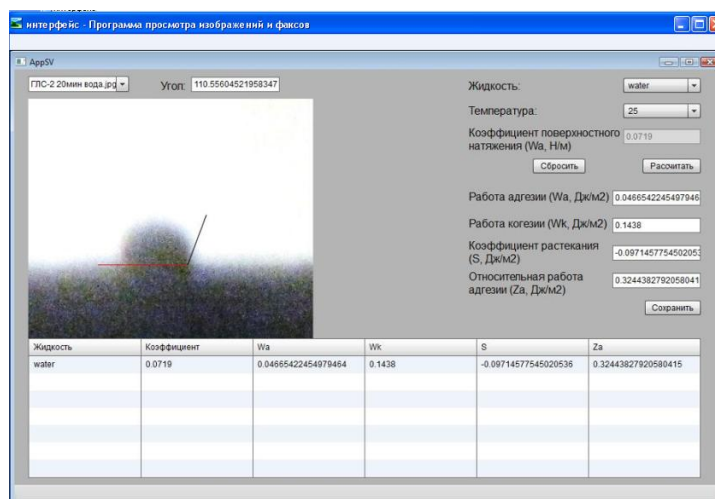


Рис. 1. Общий вид образца для испытаний интерфейс программы «AppSV» [2]

Влияние режимов активации на краевой угол смачиваемости и работу адгезии графита показано на рис. 2.

Из представленных данных видно, что активированные графиты, в отличие от природного графита, смачиваются хуже всеми исследуемыми жидкостями. Максимальная работа адгезии при этом для всех исследуемых жидкостей наблюдается при смачивании графита водой, обладающей максимальным поверхностным натяжением.

Характеристики исследуемых жидкостей

Жидкость	Поверхностное натяжение, Дж/м ²	Работа когезии, Дж/м ²
Спирт	0,022 3	0,044 6
Вода	0,072 7	0,145 4
Масло	0,035 0	0,070 0
Глицерин	0,065 7	0,131 4

В явлении смачивания немалую роль играет структура поверхности образца. Шероховатый, бугристый или пористый рельеф может ухудшить смачивание подложки жидкостью.

В сухом состоянии механоактивация приводит к повышению активности частиц, что также способствует снижению смачиваемости графита [3, 4]. Запасенная частицами энергия создает отталкивающий эффект для растекания жидкости. Увеличение количества дефектов в структуре материала в ходе активации способствует более глубокому проникновению жидкости в его поры и, следовательно, возникновению стабильных и высоких сил сцепления системы жидкость–материал. Самая низкая смачиваемость отмечена у материалов, активированных при соотношении шаров к материалу 3:1, следовательно, при этих режимах активации материал будет обладать наибольшей активностью.

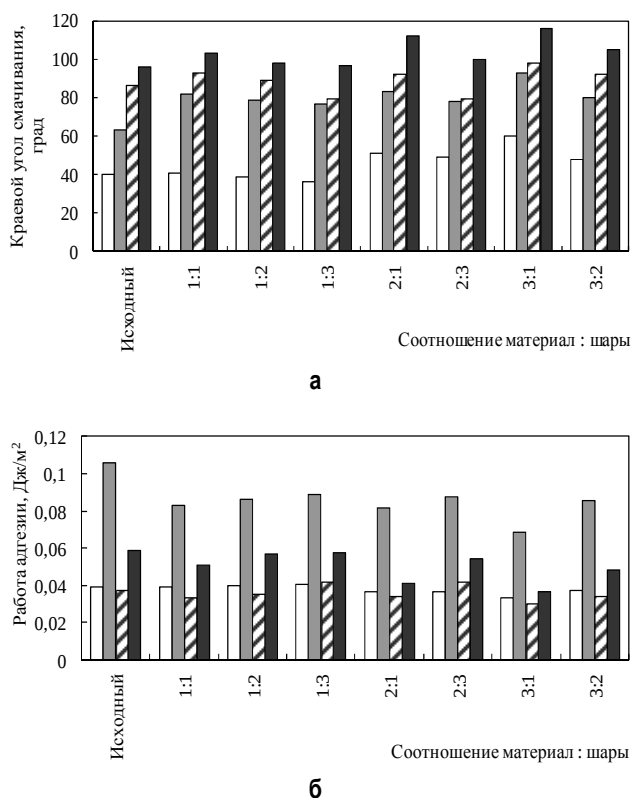


Рис. 2. Зависимость смачиваемости скрытокристаллического графита различными жидкостями от режимов активации графитов:
□ – спирт; ■ – вода; ▨ – масло; ■ – глицерин

Зависимость коэффициента растекания и относительной работы адгезии природного и активированного графитов показана на рис. 3. Чем меньше значение коэффициента растекания, тем лучше смачивает жидкость твердое тело. Из представленных данных видно, что наибольшие значения коэффициента растекания характерны для воды и глицерина. Спирт и масло, в отличие от воды и глицерина, обладают

значениями, близкими к нулю, что может свидетельствовать о хорошей смачиваемости графита этими жидкостями. Для всех исследуемых жидкостей коэффициент растекания для активированных графитов меньше, чем у природных. Это подтверждает, что активированные графиты смачиваются хуже, чем природные.

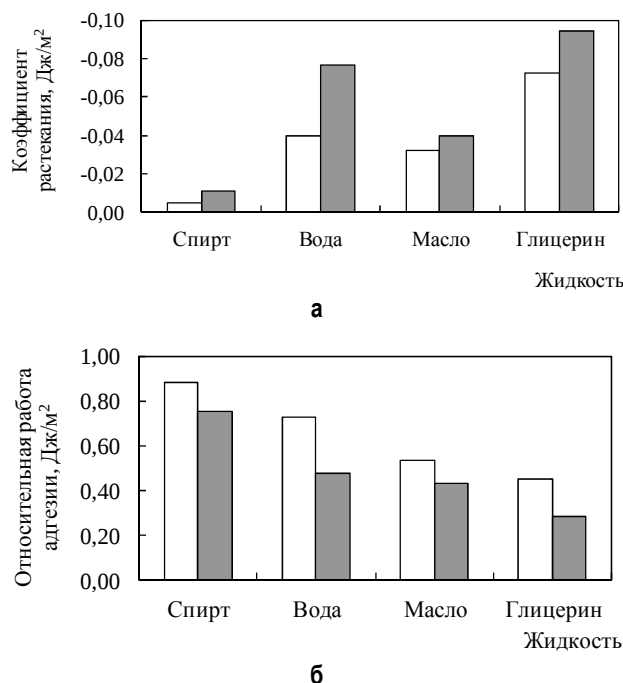


Рис. 3. Зависимость коэффициента растекания (а) и относительной работы адгезии (б) от режимов активации скрытокристаллического графита

Максимальные значения относительной работы адгезии достигаются при смачивании графита спиртом и водой.

На рис. 4 показана смачиваемость природных кристаллического и скрытокристаллического графитов и активированного отдельными и комплексными методами активации.

Из представленных данных видно, что кристаллический графит смачивается всеми исследуемыми жидкостями хуже, чем скрытокристаллический. По сравнению со скрытокристаллическим графитом, частицы кристаллического графита имеют больший размер. Поэтому поверхность образцов из кристаллического графита после уплотнения не ровная, а шероховатая за счет заостренных краев кристаллов, препятствующих растеканию капли по поверхности образца (рис. 5). Меньший размер частиц скрытокристаллического графита создает большую удельную поверхность, по которой капли растекаются достаточно хорошо.

Для окисления графита использовали бихроматную технологию. Дополнительную активацию окисленного графита осуществляли в мельнице АГО-2 в оптимальных режимах.

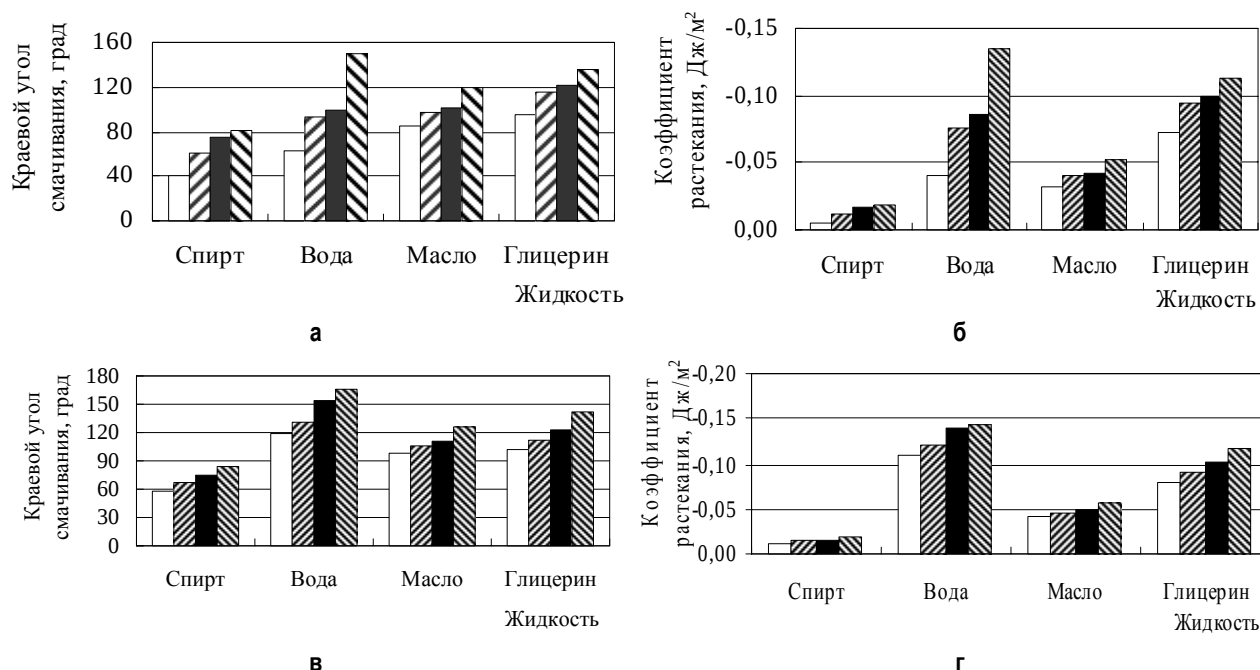


Рис. 4. Зависимость краевого угла смачиваемости графита (а, в) и коэффициента растекания (б, г) от способа его активации: а, б – скрытокристаллический графит; в, г – кристаллический графит; □ – природный; ▨ – механоактивированный; ■ – окисленный; ▩ – окисленный с последующей механоактивацией;

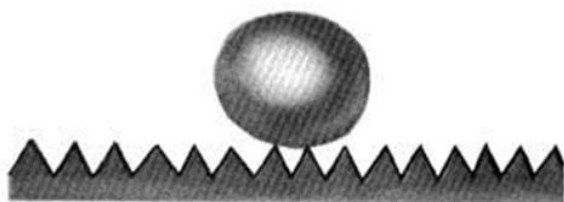


Рис. 5. Капля на графите [5]

Увеличение краевого угла смачиваемости окисленных графитов можно объяснить изменением свойств поверхности частиц. Увеличение межплоскостного расстояния и расположение атомов окислителя в межплоскостном расстоянии приводит к увеличению энергетической активности частиц, препятствующей растеканию капли по ее поверхности.

При дополнительной механоактивации окисленного графита наблюдается дальнейшее увеличение энергетической составляющей активности, что приводит к дальнейшему снижению смачиваемости графитов всеми исследуемыми жидкостями.

Таким образом, проведенные исследования пока-

зали, что смачиваемость графита любыми жидкостями существенно зависит от способа подготовки графита. Наличие на поверхности графита активных центров (у активированного графита) или инородных атомов (у окисленного графита) приводит к снижению смачиваемости графита всеми исследуемыми жидкостями (спирт, вода, масло и глицерин).

Список литературы

1. Второв Б. Б. Особенности физико-химических процессов формирования резорциновых композитов // Изв. вузов. Строительство. 2000. № 12. С. 113-115.
2. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012617194 РФ. Расчетная программа изучения смачиваемости материалов жидкостями «AppSV» / С.И. Лыткина, Л.И. Мамина, В.Н. Баранов [и др.]. Заявка №2012615180. Приоритет изобретения 22.06.12 г. Зарегистрирован 10.08.12 г. Патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет».
3. Свойства литейных суспензий на основе наноструктурированных графитов / Т. Р. Гильманшина, Л. И. Мамина, В. Н. Баранов [и др.] // Литейное производство. 2011. № 10. С. 31-35.
4. Исследование влияние режимов подготовки наполнителя на свойства наноструктурированных суспензий с различными жидкими фазами / Л.И. Мамина, В.Н. Баранов, А. И. Безруких [и др.] // Труды десятого съезда литейщиков России. Казань, 2011. С. 419-423.
5. Абрамзон А.А. Возьмем за образец лист лотоса // Химия и Жизнь. 1982. № 11. С. 38-40.

Сведения об авторах

Мамина Людмила Ивановна – канд. техн. наук, проф. ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Баранов Владимир Николаевич – канд. техн. наук, доц., директор Института цветных металлов и материаловедения ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Безруких Александр Иннокентьевич – канд. техн. наук, доц. ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Гильманшина Татьяна Ренатовна – канд. техн. наук, доц. ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Юрьев Павел Олегович – аспирант ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

RESEARCH ADDICTION WETTABILITY USED IN METALLURGY GRAPHITE VARIOUS QUALITY

Mamina Lyudmila Ivanovna – PhD (Eng.), professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk.

Baranov Vladimir Nikolaevich – PhD (Eng.), associate professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk.

Bezrukikh Alexander Innokentievich – PhD (Eng.), associate professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk.

Gilmanshina Tatyana Renatovna – PhD (Eng.), associate professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk.

Yuriev Paul Olegovich – a postgraduate student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk.

Abstract. The wettability dependence of crystalline and cryptocrystalline graphite on their preparation method (mechanical activation, oxidation, and oxidation with subsequent mechanical activation) liquids which are widely used in foundries (alcohol, water, oil, glycerol) has been investigated. Wettability contact angle was determined. To calculate the remaining coefficients (the work of adhesion, spreading coefficient and the relative work of adhesion) the program «AppSV» was used. It was found, that the greatest work of adhesion for all investigated liquids is observed when graphite is wetted with water, which has a maximum surface tension, and the lowest wettability is when graphite is wetted with alcohol. It was shown that graphite wettability with all investigated liquids essentially depends on the method of graphite preparation. So, mechanical activation leads to increased particles activity that reduces graphite wettability. Oxidized graphites have less compared wettability. With additional mechanical activation of oxidized graphite a further decrease in the wettability of graphite is observed.

Keywords: crystalline graphite, cryptocrystalline graphite, mechanical activation, oxidation, programs «AppSV», alcohol, water, oil, glycerol, contact angle, the work of adhesion, spreading coefficient, the relative work of adhesion.

References

1. Vtorov, B.B. Osobennosti fiziko-himicheskikh processov formirovaniya rezorcinovykh kompozitov [Features physico-chemical processes formation of the resorcinol composites]. *News of higher educational institutions. Building*, 2000, no. 12, pp. 113-115.
2. Lytkina S.I., Mamina L.I., Baranov V.N. [etc.]. The certificate of state registration computer program № 2012617194 RF *Design program of study materials by liquids wettability «AppSV»*. Application №2012615180. 22.06.12, the priority of invention, the patent owner since 10/08/12 "Siberian Federal University."
3. Gilmanshin T.R., Mamina L.I., Baranov V.N. [etc.]. Svoystva liteynykh suspenzij na osnove nanostrukturirovannykh grafitov [Properties of casting suspensions based on nanostructured graphite]. *Foundry*, 2011, no. 10, pp. 31-35.
4. Mamina L.I., Baranov V.N., Bezrukikh A.I. [etc.]. Issledovanie vliyanie rezhimov podgotovki napolnitelja na svoystva nanostrukturirovannykh suspenzij s razlichnymi zhidkimi fazami [Investigation of the influence modes of preparation filler on the properties of nanostructured suspensions with different liquid phases]. *Proceedings of the Tenth Congress of the Russian foundry workers*. Kazan, 2011. pp. 419-423.
5. Abramson A.A. Voz'mem za obrazec list lotosa [Take a sample of the lotus leaf]. *Chemistry and Life*. 1982, no. 11, pp. 38-40.

УДК 519.614

Балонин Н.А., Сергеев М.Б.

М-МАТРИЦЫ И КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

Аннотация. В статье приведен обзор минимаксных ортогональных матриц Адамара, Мерсенна, Ферма и Эйлера. Рассмотрены элементарные базисы из них и разложения малоуровневых ортогональных матриц на выделенные структуры. Пояснены применение моделей химических элементов, опирающихся на связь периодической таблицы Менделеева с теорией чисел, и преимущество базисов, дающих пространственные характеристики. Показаны примеры математических моделей сплавов в форме квазикристаллов, решающих теоретические трудности официальной кристаллографии.

Ключевые слова: кристаллические структуры, ортогональные матрицы, матрицы Адамара, числа Мерсенна, числа Ферма.

Введение

Давно отмечено, что между компактными математическими объектами и реально наблюдаемыми в физическом мире структурами есть соответствие. Один из давних примеров на эту тему – размышление Иоганна Кеплера о шестиконечной форме снежинки (рис.1). Он объяснил ее тем, что кристалл замерзшей воды строится из мельчайших одинаковых шариков, теснейшим образом присоединенных друг другу: вокруг центрального шарика можно плотно разместить только шесть таких же шариков.

Кристалл – упорядоченная структура, состоящая из бесконечно повторяющегося фрагмента, который называется элементарной ячейкой. Систематизация сведений в отношении допустимой симметрии кристаллов выделила кристаллическую решетку – вспомогательный геометрический образ, вводимый для

анализа строения кристалла, и поворотные оси второго, третьего, четвертого и шестого порядков, отвечающие совпадению фигуры с собой при повороте соответственно на 180, 120, 90 и 60 град. Эти догмы настолько укоренились в официальной кристаллографии, что оппонирование их привело к получению Нобелевской премии 2011 года Даном Шехтманом [1], открывшим пентаграммы в экспериментах по сверхбыстрому охлаждению сплавов алюминия и марганца.

Признанию открытия способствовали опыты британского математика Р. Пенроуза с двумя ромбами – плитками Пенроуза, построенными на пропорциях золотого сечения [2], образующими повторяющиеся узоры с дальней симметрией, как у фракталов. Подобные объекты сегодня признаны и названы квазикристаллами. Новые материалы уже используются для изготовления лезвий хирургических инструментов, особенно в глазной хирургии. Будущие перспек-

тивы очень широки, в частности, материалы с такими свойствами нужны в авиационной промышленности.

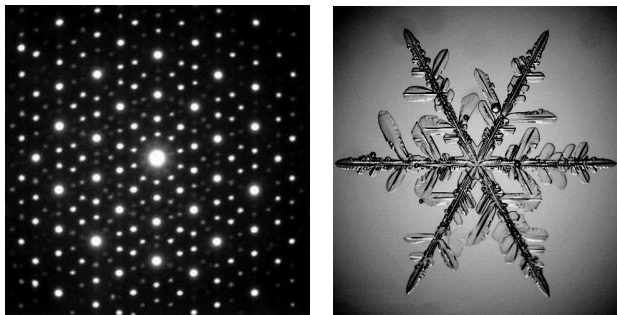


Рис. 1. Дифракционная картина квазикристалла и симметрия снежинки

Данная статья – первая попытка осветить еще один аспект задач о плотной упаковке, связанный с изучением ортогональных матриц, обладающих экстремальными свойствами.

Теория соответствия чисел и матриц ортогональных базисов

Гипотеза Адамара о кратности порядков ортогональных матриц Адамара числу 4 закладывает основы теории соответствия чисел и ортогональных базисов, речь идет об оставшихся трех соседях матриц Адамара.

Числа $4k+1$ и $4k+3$ ($4k-1$) ввели в научный обиход Ферма и Эйлер. Согласно утверждению Ферма всякое простое число вида $4k+1$ может быть представлено в виде суммы двух квадратов, причем единственным образом. Простые числа вида $4k+3$, как легко показать, не представляются в виде суммы квадратов. Эйлер установил, что верно и обратное: если представление n в виде суммы квадратов существует и единственно, то n – простое число. Минимаксными ортогональными матрицами (М-матрицами) с минимальным числом уровней, в зависимости от остатка r деления порядка n на 4, являются:

$r = 0$, матрицы Адамара $\mathbf{H}$, включающие матрицы последовательности Сильвестра;

$r = 1$, матрицы Ферма $\mathbf{F}$, включающие порядки из последовательности чисел Ферма;

$r = 2$, матрицы Эйлера $\mathbf{E}$ (и матрицы Белевича $\mathbf{C}$, с исключениями порядков на основе критерия Эйлера);

$r = 3$, матрицы Мерсенна $\mathbf{M}$, включающие порядки из последовательности чисел Мерсенна.

М-матрицы включают $\mathbf{H}$, $\mathbf{F}$, $\mathbf{E}$, $\mathbf{M}$ множества ортогональных матриц, в которых последовательности Сильвестра являются системообразующими. Оценки плотности охвата матрицами числовой оси питаются, соответственно, сходными гипотезами Адамара (перенос свойств последовательности на матрицы $\mathbf{H}$) и Балонины [4] (перенос свойств последовательности на матрицы $\mathbf{M}$). Получается общая для числовой оси теория минимаксных ортогональных базисов.

Минимаксные ортогональные базисы Мерсенна и Ферма

Матрицы Адамара – пример экстремальных матриц ортогональных базисов, дающих минимальную максимальную проекцию их ортов на оси координат.

Обобщение этой задачи на случай матриц любого порядка дает нетривиальные решения, например, крестовина из двух отрезков при ее повороте составляет оси минимального квадрата, однако минимальный охватывающий «трехмерный еж» параллелепипед вовсе не куб. Одна из проекций оптимального ежа на ось координат вдвое меньше двух остальных.

Напомним, что матрица Адамара (Hadamard) – квадратная двухуровневая матрица $\mathbf{H}_n$ порядка n , состоящая из чисел $\{1, -1\}$, столбцы которой ортогональны

$$\mathbf{H}_n^T \mathbf{H}_n = n \mathbf{I},$$

где $\mathbf{I}$ – единичная матрица.

Адамар примерами матриц 12-го и 20-го порядка дополнил известную в теории последовательности Сильвестра ортогональных матриц четных порядков $n=2^k$ [4].

В работах [5,6] предложены адекватные им версии малоуровневых ортогональных матриц, отвечающих нечетным порядкам, равным числам Мерсенна и Ферма. Последовательность Мерсенна задается формулой $n=2^k-1$ и начинается с чисел 1, 3, 5, 15, 31, ..., она принадлежит подмножеству чисел вида $4k-1$. Последовательность Ферма задается формулой

$n=2^{2^k}+1$ и начинается с чисел 3, 5, 17, 257, 65537, 4294967297, 18446744073709551617, ..., она принадлежит подмножеству чисел вида $4k+1$.

Дадим определения нужных нам, в аспекте данной работы, малоуровневых матриц.

Определение 1. Матрица Мерсенна – это квадратная двухуровневая матрица $\mathbf{M}_n$ порядка n , состоящая из чисел $\{a=1, -b\}$, столбцы которой ортогональны

$$\mathbf{M}_n^T \mathbf{M}_n = \mu^2 \mathbf{I},$$

где $b = \frac{1}{2}$ при $n=3$, в остальных случаях

$$b = \frac{q - \sqrt{4q}}{q - 4}, \quad q = n+1 \text{ (порядок матрицы Адамара), вес}$$

$$\mu^2 = \frac{(n+1) + (n-1)b^2}{2} \text{ учитывает, что } \frac{q}{2} \text{ элементов}$$

каждого столбца составляют $a = 1$, остальные элементы равны $-b$.

Итерационная процедура вычисления двухуровневых ортогональных матриц, порядки которых равны числам Мерсенна вида $n=2^k+1$, получается модификацией [5] алгоритма Сильвестра. Так же, как у матриц Адамара, это множество расширяется до матриц порядков $n=4k+3$.

Определение 2. Матрица Ферма – это квадратная трехуровневая матрица $\mathbf{F}_n$ порядка n , состоящая из чисел $\{a=1, -b, s\}$, столбцы которой ортогональны

$$\mathbf{F}_n^T \mathbf{F}_n = f^2 \mathbf{I},$$

где $b = \frac{2}{3}$ при $n = 5$, в остальных случаях

$$b = \frac{2n-q}{q}, s = \frac{\sqrt{np-2\sqrt{p}}}{q}, q = p + \sqrt{p}, p = n-1$$

(порядок матрицы Адамара), s – элементы первой строки и столбца, начинающихся с a (т.е. каймы матрицы $b < s < a$).

$$\text{Вес } f^2 = \frac{(2p-q) - (2p-q)b^2}{2} + nb^2 + s^2 \text{ учи-}$$

тывает, что $p - \frac{q}{2}$ элементов прочих столбцов составляют $a = 1$, остальные элементы равны $-b$ (помимо начального s).

Итерационная процедура вычисления трехуровневых ортогональных матриц, порядки которых равны числам Ферма, а также числам вида $n = 2^k + 1$, где k – четное (за исключением $k = 1$, когда $b = s = 2$), получается модификацией [6] алгоритма Сильвестра.

Обе отмеченные структуры локально-оптимальны по критерию минимума максимума абсолютных значений элементов (максимума m -нормы), они строго оптимальны в рамках выделенной малоуровневой структуры, как и матрицы Адамара, и стремятся к ним с ростом порядка. В этом построении отсутствуют порядки $n = 2^k + 2$, что восполняется построением минимаксных ортогональных базисов Эйлера.

Минимаксные ортогональные базисы Эйлера

Определение 3. Матрица Эйлера – это квадратная четырехуровневая матрица E_n порядка n , состоящая из чисел $\{a=1, -a, b, -b\}$, столбцы которой ортогональны

$$E_n^T E_n = \xi I,$$

где $b = \frac{1}{2}$ при $n=6$, в остальных случаях

$$b = \frac{q - \sqrt{8q}}{q - 8}, q = n + 2 \text{ (порядок матрицы Адамара), вес}$$

$$\xi = \frac{(n+2) + (n-2)b^2}{2} \text{ учитывает, что } \frac{q}{2} \text{ модулей}$$

элементов каждого столбца такой матрицы имеют значения $a = 1$, модули остальных элементов равны $b < 1$.

Техника построения матриц Эйлера наследует способ построения матриц Адамара удвоением порядка по правилу Сильвестра из матриц Мерсенна

$$E_n = \begin{pmatrix} M_{n/2} & M_{n/2} \\ M_{n/2} & -M_{n/2} \end{pmatrix},$$

где $M_{n/2}$ – двухуровневая матрица Мерсенна вдвое

меньшего нечетного порядка, состоящая из чисел $\{a=1, -b\}$, с пересчетом их уровней согласно выше приведенным формулам [7].

Иерархия минимаксных ортогональных базисов и связь с химическими элементами

Дополнение матриц Адамара матрицами четных и нечетных порядков создает структурный базис вложенных матричных элементов: матриц первого (Odin), второго (Euler), третьего (Mersenne), четвертого (Hadamard) и пятого (Fermat) порядков, приведенных на рис. 2. Цвет клеток соответствует уровням $a = 1$ (белый), $-b$ (черный) и s (серый).

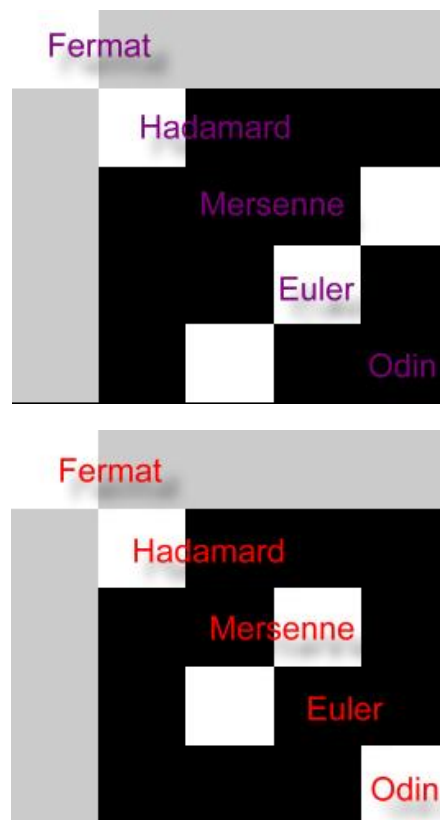


Рис. 2. Пять вложенных элементов минимаксных ортогональных базисов

Пятый элемент этой иерархии (матрица Ферма) восполняет отсутствие какой-либо структуры у первого единичного элемента. Этот базис, как и в случае плиток Пенроуза, может быть удвоен диагонализацией матрицы Мерсенна, что встречается, например, при построении двухуровневой минимаксной ортогональной матрицы тринадцатого порядка M_{13} из двух сортов клеток Мерсенна M_3 , обозначенных как $Me1$, $Me2$ (рис. 3).

Построение периодической таблицы химических элементов Менделеева наследует у теории чисел (и, соответственно, ортогональных базисов) характерные для нее периоды. В частности, порядкам матриц Адамара соответствуют элементы: Гелий 4 (атомная масса 4,002602), Неон 20 (20.1797), Аргон 40 (39.948) и т.п., а также Углерод 12, Кислород 16, Кремний 28,

Германий 72. Порядкам обобщенных матриц Мерсенна $n=4k+3$ – последовательность радиоактивных элементов, называемая рядом актиния: Уран 235, Плутоний 239 (изотоп, который является более мощным источником атомной энергии, чем Уран) и т.п. В ряду, соответствующем матрицам Ферма и их замещениям, стоят волею судьбы Фермий 257, Золото 197. Медь 64 и Серебро 108, символы электроники, соответствуют матрицам Адамара. Порядкам матриц Эйлера соответствует Азот 14, а с золотым сечением связан Бор – атомная масса наиболее близка к 10 (точнее 10.8).

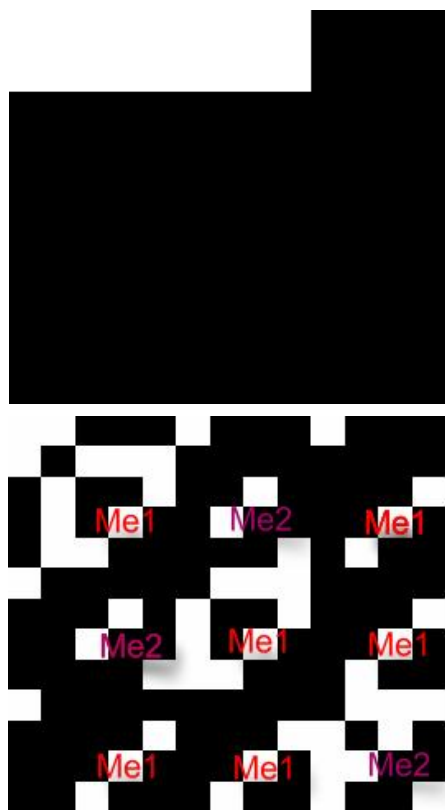


Рис. 3. Строение матрицы M_{13} и гистограмма модулей ее элементов

Форма кристалла бора – икосаэдр, пять треугольников образуют вершину. Бор – достаточно скрытный элемент. Строение каркаса в его структурах гораздо сложнее, чем в алмазе. Уникальный тип химической связи, которая позволяет бору поглощать любую примесь, очень плохо изучен, хотя за исследования, связанные с ним, большое количество ученых уже получили Нобелевские премии.

Хаотические решения

Известная нестабильность тяжелых элементов имеет у их аналогов – минимаксных ортогональных матриц – свою интерпретацию. Также как и химические элементы, минимаксные матрицы в итерациях поискового алгоритма сжатия их m -нормы с ростом размерности неустойчивы, а устойчивые решения имеют выделенные в данной статье структурные признаки. Приведенная выше двухуровневая матрица M_{13} лишь

локально-оптимальна. В работе авторов [8] показано, что на тринадцатом порядке по критерию m -нормы начинает превалировать хаотическая структура. Эта структура в работе изучена, приведен численный показатель в виде специфической меры хаоса: B -уровень для m -нормы. Показаны примеры бифуркаций уровней ортогональных M -матриц, среди которых рассмотренные выше отвечают максимально простой структуре.

При переходах от матрицы к матрице вниз по порядку наблюдается усложнение структуры уровней: двухуровневые матрицы Адамара и Мерсенна замещаются четырехуровневой структурой матриц Эйлера, на пятом порядке наблюдается наличие пятиуровневой структуры, альтернативной трехуровневой структуре матриц Ферма. Все это говорит о том, что структурные признаки распространяются как вверх по порядкам, так и вниз, причем матрицы Адамара составляют специфические узлы стабильности. Начиная с порядка $n = 10$ встречаются отдельные оригинальные матрицы золотого сечения и прочие артефакты [9]. Континуальные множества решений, возможные у локально-оптимальных матриц, также не рассматривались ранее.

Заключение

Задачи плотной упаковки имеют достаточно важные интерпретации в области физических экспериментов, в частности, относительно недавно это существенно продвинуло понимание структуры квазикристаллов.

Главная заслуга Д. Шехтмана заключалась в том, что он не списал полученные результаты на случайность, как это делали многие до него. Не исключено, что математические особенности выделенных выше элементарных минимаксных базисов имеют существенное отражение на физический эксперимент, также достаточно интересное для исследования, поскольку в отличие от модели Пенроуза рассматривается не плоская, а n -мерная модель. Однако освещение таких интерпретаций выходит за рамки данной статьи.

Хаос в построении минимаксных ортогональных базисов и островки стабильности могут сделать их востребованными при математическом моделировании квазистабильных химических элементов, кристаллов и сплавов.

Список литературы

1. Shechtman D., Blech I., Gratias D., Cahn J. W. Metallic Phase with Long-Range Orientational Order and No Translational Symmetry // Physical Review Letters, 1984. Vol. 53. P. 1951-1953.
2. Penrose R. Pentaplexity // Evreka. 1978. Vol. 39. P. 16-22.
3. Hadamard J. Résolution d'une question relative aux déterminants. Bulletin des Sciences Mathématiques 17: 1893, P. 240-246.
4. Балонин Н.А. О существовании матриц Мерсенна 11-го и 19-го порядков // Информационно-управляющие системы. 2013. № 2. С. 90-91.
5. Балонин Н.А., Сергеев М.Б., Мироновский Л.А. Вычисление матриц Адамара-Мерсенна // Информационно-управляющие системы. 2012. № 5. С. 92-94.
6. Балонин Н.А., Сергеев М.Б., Мироновский Л.А. Вычисление матриц Адамара-Ферма // Информационно-управляющие системы. 2012. № 6. С. 90-93.
7. Балонин Н.А., Сергеев М.Б. О двух способах построения матриц Адамара-Эйлера // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1. С. 7-10.
8. Балонин Н.А., Сергеев М.Б. М-матрицы // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1. С. 14-21.
9. Балонин Ю. Н., Сергеев М. Б. М-матрица 22-го порядка // Информационно-управляющие системы. 2011. № 5. С. 87-90.

Сведения об авторах

Балонин Николай Алексеевич – д-р техн. наук, проф. Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (СПбГУАП). E-mail: korbendfs@mail.ru.

Сергеев Михаил Борисович – д-р техн. наук, проф., директор НИИ информационно-управляющих систем Национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. E-mail: mbse@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

M-MATRICES AND CRYSTAL STRUCTURES

Balonin Nikolaj Alekseevich – D.Sc. (Eng.), professor Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI). E-mail: korbendfs@mail.ru

Sergeev Mikhail Borisovich – D.Sc. (Eng.), professor, Director of Information and Control Systems Institute, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics. E-mail: mbse@mail.ru.

Abstract. This article provides an overview of Minimax orthogonal Hadamard, Mersenne, Fermat and Euler matrices. The elementary basis of these matrices and low-levels orthogonal matrices with the shown structures are considered. The models of chemical elements, based on the relationship of the periodic table of Mendeleev with the theory of numbers, and the advantage of bases, giving the spatial characteristics, are explained. Examples of mathematical models of alloys in the form of quasicrystals solving theoretical difficulties of the official crystallography are clarified.

Keywords: crystal structures, orthogonal matrices, Hadamard matrices, Mersenne primes, Fermat numbers.

References

1. Shechtman D., Blech I., Gratias D., Cahn J. W. Metallic Phase with Long-Range Orientational Order and No Translational Symmetry. *Physical Review Letters*, 1984, vol. 53, pp. 1951-1953.
2. Penrose R. Pentaplexity. *Evreka*. 1978, vol. 39, pp. 16-22.
3. Hadamard J. Résolution d'une question relative aux déterminants. *Bulletin des Sciences Mathématiques* 17: 1893, P. 240–246.
4. Balonin N.A. Mersenne matrices of 11-th и 19-th order existence. *Informatsionno-upravlyayushhie sistemy* [Information and Control Systems]. 2013, no. 2, pp. 90-91.
5. Balonin N.A., Sergeev M.B., Mironovsky L.A. Calculation of Hadamard-Mersenne Matrices. *Informatsionno-upravlyayushhie sistemy* [Information and Control Systems]. 2012, no. 5, pp. 92-94.
6. Balonin N.A., Sergeev M.B., Mironovsky L.A. Calculation of Hadamard-Fermat Matrices. *Informatsionno-upravlyayushhie sistemy* [Information and Control Systems]. 2012, no. 6, pp. 90-93.
7. Balonin N.A., Sergeev M.B. Hadamard-Euler matrix calculation by two methods *Informatsionno-upravlyayushhie sistemy* [Information and Control Systems]. 2013, no. 1, pp. 7-10.
8. Balonin N.A., Sergeev M.B. M-matrices. *Informatsionno-upravlyayushhie sistemy* [Information and Control Systems]. 2011, no. 1, pp. 14-21.
9. Balonin Yu.N., Sergeev M.B. M-matrix of the 22nd Order. *Informatsionno-upravlyayushhie sistemy* [Information and Control Systems]. 2011, no. 5, pp. 87-90.

УДК 669.018.58.017

Чукин М.В., Голубчик Э.М., Кузнецова А.С., Родионов Ю.Л., Кормс И.А., Бухвалов Н.Ю., Касаткин А.В., Подузов Д.П.

РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СПЛАВОВ ИНВАРНОГО КЛАССА С РАСШИРЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ*

Аннотация. Рассмотрены современные требования и подходы к получению новых сплавов с повышенными физико-механическими характеристиками, а также области их применения. Представлены базовые принципы разработки композиций инварных сплавов с высокими показателями механических свойств при низких значениях температурного коэффициента линейного расширения. Проанализировано влияние химических составов на достижение расширенного диапазона эксплуатационных свойств многофункциональных сплавов на примере железоникелевых композиций. Приведены результаты исследований влияния легирующих элементов на коррозионную стойкость высокопрочных инварных сплавов.

Ключевые слова: многофункциональные сплавы, инвары, прочность, термомеханическое упрочнение, температурный коэффициент линейного расширения.

На настоящем этапе развития техники и технологий одним из ведущих направлений является разработка и внедрение новых материалов, обладающих сочетанием уникальных физико-механических и экс-

плуатационных свойств. Новые материалы для современной техники должны обладать не только определенным уровнем основных характеристик, но и удовлетворять целому комплексу дополнительных требований. В частности, в ряде случаев необходимо обеспечить высокую стабильность геометрических форм и размеров отдельных частей или всего изделия при изменении рабочей температуры. Для этой цели используют специальные сплавы на железоникелевой основе – инварные сплавы. Основным свойством инварных сплавов является низкая величина температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР). Сплавы инварного класса благодаря их уни-

* Работа проведена в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения (договор № 02.G25.31.0040; программы стратегического развития университета на 2012 – 2016 гг. (конкурсная поддержка Минобрнауки РФ программ стратегического развития ГОУ ВПО), а также гранта в форме субсидии на поддержку научных исследований (соглашение № 14.B37.21.0068).

кальным тепловым свойствам являются перспективными материалами для использования в различных областях точного машино- и приборостроения. Потребность промышленности в таких сплавах обусловлена тем, что конструкторские разработки большинства изделий усовершенствованы до такой степени, что практически исчерпаны возможности используемых в них материалов и, следовательно, невозможно существенно повысить качество и эксплуатационные свойства этих изделий. Получить принципиально новые технические характеристики изделий на основе инваров можно, если при их изготовлении использовать качественно новые материалы, композиции сплавов и технологии их производства [1-4].

Широко используемые в настоящее время инварные сплавы имеют ряд недостатков – низкий уровень прочностных свойств и долговечности при механических колебаниях, неудовлетворительную коррозионную стойкость и др. Низкие механические свойства затрудняют использование материалов на основе инваров в высоконагруженных или крупногабаритных конструкциях. Эти недостатки в значительной степени ограничивают области применения известных инварных сплавов, а также уменьшают эффективность их использования.

В ФГБОУ ВПО «МГТУ» совместно с учеными ЦНИИЧЕРМЕТ им. П.И. Бардина и специалистами ОАО «Мотовилихинские заводы» (г. Пермь) проводится комплекс исследований по созданию многофункциональных сплавов на железоникелевой основе, обладающих минимальным ТКЛР и высоким уровнем механических свойств [5].

Изучались два типа высокопрочных инварных сплавов. Сплавы первого типа должны иметь минимальное тепловое расширение ТКЛР $\leq 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в широком диапазоне рабочих температур ($-70 \div +100^\circ\text{C}$), повышенную твердость (выше, чем у «традиционного» сплава 36Н), улучшенную обрабатываемость резанием и низкую температуру начала мартенситного превращения (ниже -80°C). ТКЛР сплавов второго типа должен быть близок к тепловому расширению керамики, кремния, пьезокерамики и тугоплавких стекол, или, другими словами, находится в диапазоне $(2,5 \div 7,5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. При применении этих сплавов в ответственных изделиях повышенной точности, работающих в условиях, отличных от климатических, требуется сочетание комплекса свойств, а именно заданного ТКЛР, высокой прочности, высокой долговечности при механических колебаниях в диапазоне температур от -80 до $+150^\circ\text{C}$.

Базовыми для разработки таких материалов были выбраны сплавы системы Fe-Ni-Co с добавками углерода и ванадия. Выбор данных композиций обусловлен нижеизложенными принципами.

Добавки углерода в железоникелевые сплавы приводят к уменьшению величины ТКЛР, а также к упрочнению этих сплавов. Установлено, что в аустенитных сплавах Fe-Ni(28 ÷ 35%)-C(0,1 ÷ 1,0%) образуются концентрационные неоднородности: области, обогащенные углеродом и обедненные никелем, а также области, обогащенные никелем и обедненные углеродом [6, 7].

Посредством термдеформационного наноструктурирования сплавов Fe-Ni-C можно в значительной мере снизить ТКЛР при одновременном повышении прочностных свойств. Кроме того, известно влияние карбидообразующих элементов, в частности ванадия, на тонкую атомно-кристаллическую структуру и физико-механические свойства сплавов системы Fe-Ni-C. Показано, что в результате нагрева при $500 \div 700^\circ\text{C}$ происходит перераспределение атомов, при этом атомы углерода уходят из областей, содержащих никель, и образуют карбиды.

Наиболее значительное повышение механических свойств – твердости до 3500 Н/мм^2 , временного сопротивления разрыву более 800 Н/мм^2 (при сохранении низкого термического расширения инварных сплавов), обеспечивается перераспределением атомов на ранних стадиях старения, когда размер частиц не превышает 100 нм , а появление карбидной фазы еще не регистрируется дифракционными методами. В ходе исследований установлено, что в сплавах Fe-Ni-C с концентрацией никеля менее 34% понижение ТКЛР наблюдается при увеличении содержания углерода от 0 до $0,4 \div 0,6\%$, а при дальнейшем росте его концентрации величина ТКЛР меняется слабо. Это связано с тем, что при концентрации углерода в сплаве выше 0,4% содержание углерода в твердом растворе не повышается, а избыточный углерод выделяется в виде графита. Таким образом, наиболее эффективным, с точки зрения воздействия на ТКЛР, оказывается легирование углеродом при концентрациях ниже 0,4%. Кроме того, добавки углерода в сплавы Fe-Ni вблизи инварного состава расширяют интервал температур, в котором сохраняется низкое значение ТКЛР, и понижают температуру начала мартенситного превращения M_s , то есть увеличивают морозостойкость сплава.

На рис. 1 приведены результаты измерений ТКЛР железоникелевых сплавов с разным содержанием никеля и углерода. Как видно, по мере увеличения содержания углерода в сплавах, содержащих менее 34% никеля, происходит понижение ТКЛР. С повышением содержания углерода концентрация никеля, отвечающая минимальному значению ТКЛР, уменьшается, а его значение несколько возрастает.

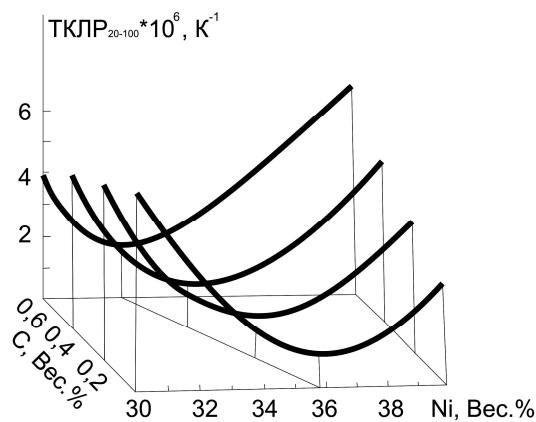


Рис. 1. Зависимость ТКЛР сплавов Fe-Ni-C от концентрации никеля и углерода

Важной особенностью сплавов Fe-Ni-C является то, что добавки углерода в железо-никелевые сплавы расширяют температурный диапазон, в котором сохраняется пониженное значение ТКЛР. В частности, в углеродсодержащем сплаве Fe-34%Ni-0,4%С диапазон температур, в котором сохраняется низкое значение ТКЛР, почти на 80°C шире, чем в сплаве без углерода (рис. 2).

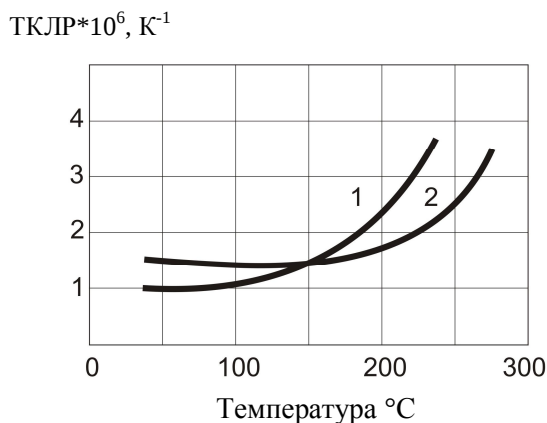


Рис. 2. Температурная зависимость ТКЛР сплавов 36Н (1) и Fe-34%Ni-0,4%С (2)

Такое влияние углерода на расширение температурного диапазона, в котором сохраняется пониженное значение ТКЛР, обусловлено как повышением температуры Кюри, так и возрастанием степени магнитной неомогенности железоникелевых сплавов при увеличении содержания углерода.

Так как углерод расширяет интервал температур, при которых сохраняются низкие значения ТКЛР, и понижает температуру начала мартенситного превращения M_n , то для улучшения свойств сплава типа 32НК целесообразно легирование углеродом в концентрациях 0,1-0,3%.

На основании проведенных исследований установлено, что величина ТКЛР, близкая к $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в достаточно широком температурном диапазоне ($-100 \div +100^\circ\text{C}$), в сочетании с повышенным уровнем механических свойств наблюдается при следующем составе: Fe-(32-34)%Ni-(2-4)%Co-(0,1-0,2)%C.

При создании сплавов второго типа (ТКЛР $2,5 \div 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) исходили из того, что для повышения прочностных характеристик и добротности можно добиться путем закрепления дислокаций. Эффективным способом, позволяющим реализовать эти процессы, является введение атомов примесей внедрения, которые обладают высокой энергией связи с дислокациями, а также элементов, образующих с внедренными атомами соединения. В качестве примеси внедрения может быть использован углерод. Согласно имеющимся литературным данным углерод закрепляет дислокации при сравнительно низких температурах $\sim 100^\circ\text{C}$. Образование карбидов, например ванадия, при нагреве сплавов выше 600°C может приводить к дальнейшему закреплению дислокаций и, соответственно, к повышению прочности и добротности.

В связи с этим, в качестве базового был выбран сплав на основе системы железо-никель-углерод-ванадий. Содержание углерода следует выбирать таким образом, чтобы часть его ($0,2 \div 0,3\%$) шла на образование карбида ванадия, а другая часть ($0,3 \div 0,4\%$) оставалась в твердом растворе. Таким образом, при содержании ванадия $1 \div 1,5\%$ общее содержание углерода в сплаве должно находиться в интервале $0,4 \div 0,7\%$ (Fe-(32-34)%Ni-(3-4)%Co-(0,4-0,7)%C-(1-1,5)%V).

С другой стороны, из кривых зависимости ТКЛР от содержания никеля и углерода, подобных приведенным на рис. 1, было установлено, что величина ТКЛР, близкая к $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, наблюдается при $\sim 34\%$ Ni, $\sim 0,2\%$ C и $\sim 1\%$ V. Для снижения температуры M_n и расширения температурного интервала с низкими значениями ТКЛР в твердом растворе необходимо иметь примерно $0,3 \div 0,4\%$ углерода, так что общее содержание углерода в сплаве также составляет $0,4 \div 0,7\%$. Дополнительного снижения температуры M_n можно достигнуть и небольшим повышением концентрации никеля. Таким образом, в качестве базового состава высокопрочного инварного сплава второго типа с низким ТКЛР может быть рекомендован следующий: Fe-(32-34)%Ni-(3-4)%Co-(0,4-0,7)%C-(1-1,5)%V.

Сплавы на основе системы Fe-Ni-C имеют невысокую коррозионную стойкость в условиях повышенной влажности и морского тумана. В связи с этим в рамках настоящих исследований была поставлена задача разработать сплав с повышенной коррозионной стойкостью в условиях высокой влажности и солевого тумана, высокими прочностными характеристиками, низкими и заданными (для согласования с керамикой) значениями температурного коэффициента линейного расширения ($\sim 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), повышенной морозостойкостью и высокой добротностью. За основу был принят коррозионностойкий инварный сплав 54K9X, который обладает высокой коррозионной стойкостью. Основными недостатками этого сплава являются узкий диапазон концентраций компонентов, в котором реализуются низкие значения ТКЛР и высокая температура начала мартенситного превращения ($\sim -30 \div -50^\circ\text{C}$). Причем мартенситное превращение происходит не только в результате охлаждения, но и при деформации происходящей в процессе механической обработки при изготовлении из сплава изделий. С целью устранения перечисленных недостатков было предложено ввести углерод в сплавы системы Fe-Co-Cr. Добавки углерода расширяют температурную область существования γ -твердого раствора и тем самым стабилизируют γ -фазу к последующим превращениям при охлаждении и деформации. Также добавки углерода приводят к упрочнению сплава и к расширению температурного интервала, в котором реализуется низкое значение ТКЛР. Таким образом, для обеспечения высоких коррозионных свойств, минимальных значений ТКЛР и высоких прочностных свойств была предложена следующая композиция химических элементов многофункционального сплава: кобальт — $44,0 \div 53,0\%$, хром — $9,0 \div 11,0\%$, углерод — $0,05 \div 0,4\%$.

Выводы

В ходе проведенных исследований по характеру формирования физико-механических и эксплуатационных характеристик многофункциональных сплавов инварного класса были разработаны базовые композиции, обеспечивающие высокие значения прочностных свойств в сочетании с низкими значениями ТКЛР и повышенной коррозионной стойкостью.

Список литературы

1. Рабинович С. В., Харчук М. Д., Черменский В. И. О влиянии микрорасширения никеля на тепловое расширение литейных железоникелевых сплавов // Изв. вузов. Черная металлургия. 1994. № 10. С. 29-32.
2. Температурный коэффициент линейного расширения литейных инваров Fe-Ni и суперинваров Fe-Ni-Co / Огородникова О.М., Черменская Е.В., Рабинович С.В., Грачев С.В. // ФММ. 1999. Т. 88. № 4. С. 46-50.

3. Пат. 2183228 РФ. Литейный сплав на основе железа / Рабинович С.В., Харчук М.Д., Черменский В.И. и др. Оpubл. 10.06.2002. Бюл. № 16.
4. Перспективы производства высокопрочной стальной арматуры из высокоуглеродистых марок стали / Чукин М.В., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Полякова М.А. // Черные металлы. 2012, дек. С. 8-15.
5. Реализация проекта малотоннажного производства наноструктурированных заготовок из многофункциональных сплавов со специальными свойствами / Чукин М.В., Гун Г.С., Голубчик Э.М., Кузнецова А.С., Бухвалов Н.Ю. // XIV International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering». A collective monograph edited by prof. dr hab inz. Henrek Dya, dr hab. inz. Anna Kawalek, prof. PCz. Chapter 1. Series: Monografie Nr 24. Polish. Czestochowa. 2013. С. 374-379.
6. Rodionov Y.L., Mogutnov B.M., Shaposhnikov N.G., Korms I.A., Pozdnyakov V.A., Mishanin S.V., Malinov V.I. Alloys with thermal expansion matching to electrolyte materials for solid oxide fuel cells. Inter. J. of Materials Research. vol. 101, July 2010.
7. Высокопрочные инварные сплавы / Родионов Ю.Л., Щербединский Г.В., Максимова О.П., Юдин Г.В. // Сталь. 2000. № 5. С. 76-80.

Сведения об авторах

Чукин Михаил Витальевич – д-р техн. наук, проф., проректор по научной и инновационной работе, зав. кафедрой машиностроительных и металлургических технологий ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.: 8 (3519) 29-84-04. E-mail: chukin@magtu.ru.

Голубчик Эдуард Михайлович – канд. техн. наук, доц. кафедры машиностроения и металлургических технологий ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: golub66@mail.ru.

Кузнецова Алла Сергеевна – научный сотрудник ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.: 8 (3519) 29-85-12.

Родионов Юрий Львович – д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, г. Москва.

Кормс Ирина Антоновна – научный сотрудник ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, г. Москва.

Бухвалов Николай Ювенальевич – генеральный директор ОАО «Мотовилихинские заводы», г. Пермь.

Касаткин Алексей Валерьевич – главный металлург ОАО «Мотовилихинские заводы», г. Пермь.

Подузов Денис Павлович – зам. главного металлурга ОАО «Мотовилихинские заводы», г. Пермь.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF INVAR CLASS MULTIFUNCTIONAL ALLOYS WITH ENHANCED PERFORMANCE CHARACTERISTICS

Chukin Mihail Vitalevich – D.Sc. (Eng.), professor, Vice-Rector for Science and Innovation, Head of Mechanical Engineering and Metallurgical Technologies department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Phone: 8(3519) 29-84-04. E-mail: chukin@magtu.ru.

Golubchik Eduard Mikhailovich – Ph.D. (Eng.), associate professor, Mechanical Engineering and Metallurgical Technologies department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. E-mail: golub66@mail.ru.

Kuznetsova Alla Sergeevna – research fellow, Mechanical Engineering and Metallurgical Technologies department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Phone: 8(3519) 29-85-12.

Rodionov Yuri Lvovich – D.Sc. (Phys.-Math.), chief research fellow, Central Research Institute of Ferrous Metallurgy named after I.P. Bardin, Moscow.

Korms Irina Antonovna – research fellow, Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy, Moscow.

Bukhvalov Nikolay Uvenalevich – General Director of Motovilikhinskiye zavody OSJC, Perm.

Kasatkin Aleksiy Valerevich – major metallurgist of Motovilikhinskiye zavody OSJC, Perm.

Poduzov Denise Pavlovich – deputy major metallurgist of Motovilikhinskiye zavody OSJC, Perm.

Abstract. Modern requirements and approaches to getting new alloys with increased strength and physical characteristics as well as their applications have been considered. Basic principles of composition developing of invar alloys with high mechanical properties at temperature coefficient low values of linear expansion have been presented. Chemical compositions influence on reaching the spread range of multi-purpose alloys operational properties on the example of iron-nickel compositions has been analyzed. Research results of the influence of alloying elements on corrosion resistance of high-strength invaralloys are provided.

Keywords: multifunctional alloys, invars, durability, thermal strain-hardening, temperature coefficient of linear expansion.

References

1. Rabinowitz S.V., Kharchuk M. D., Chermensky V.I. On the influence of microexpansion on thermal expansion of Nickel nickel-iron alloys Foundry. Izvestiya vuzov [Izv. institutions of higher education. The steel industry]. 1994, no. 10, pp. 29-32.
2. Ogorodnikov O. M., Chermenskaya E. V., Rabinovich S.V., Grachev S.V.

Temperature coefficient of linear expansion of cast invar superinvars Fe-Ni and Fe-Ni-Co. FMM. 1999, vol. 88, no. 4, pp. 46-50.

3. Rabinovich M.D., Kharchuk S.V., Chermensky V.I. etc. Cast iron-based alloy. Patent RF, no. 2183228, 2002.
4. Chukin M.V., Gun G.S., Korchnov A.G., Polyakova M.A. Prospects of production of high-carbon steel, high-strength steel grades. Chernye metallurgiya [Ferrous metals]. December, 2012, pp. 8-15.
5. Chukin M.V., Gun, G.S., Golubchik E.M., Kuznetsova A.S., Bukhvalov N.Yu. The project of small tonnage production of multifunctional nanostructured alloys with special properties // A collective monograph edited by prof. dr hab inz. Henrek Dya, dr hab. inz. Anna Kawalek, prof. PCz. Chapter 1. Series: Monografie Nr 24. Polish. Czestochowa, 2013, pp. 374-379.
6. Rodionov Y.L., Mogutnov B.M., Shaposhnikov N.G., Korms I.A., Pozdnyakov V.A., Mishanin S.V., Malinov V.I. Alloys with thermal expansion matching to electrolyte materials for solid oxide fuel cells. Inter. J. of Materials Research. July 2010, vol. 101.
7. Rodionov Y.L., Scherbedinskij G.V., Maksimova O.P., Yudin G.V. High-strength invar alloy. Steel. 2000, no. 5, pp. 76-80.

УДК 621.762

Слабкий Д.В.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРЯЧЕДЕФОРМИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МЕХАНОХИМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОЙ СТРУЖКИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д-16

Аннотация. Исследовано влияние концентрации никеля (0-6% масс.) в шихте и времени размола (1,8-14,4 кс) на гранулометрический состав и механические свойства материала на основе измельченной стружки Д-16. Оптимизировано содержание никеля и время размола, обеспечивающие максимальный выход фракций, размером -63 мкм, а также наилучшие механические свойства.

Ключевые слова: стружка Д-16, механохимическая активация, измельчение.

Введение

Использование методов порошковой металлургии энергетически более целесообразно по сравнению с получением заготовок другими методами (литье, штамповка с последующей обработкой до получения готовой детали). Также методы порошковой металлургии позволяют снизить стоимость производства деталей.

В ЮРГТУ (НПИ) разработаны технологии получения горячедеформированных порошковых материалов на основе механохимически активированной (МХА) стружки алюминиевого сплава Д-16. Показано, что применение насыщенного водного раствора ортоборной кислоты является эффективным способом диспергирования алюминиевой стружки при МХА. Установлены оптимальные значения содержания насыщенного водного раствора борной кислоты в шихте (20% масс.) и время обработки стружки в высокоэнергетической мельнице (10,8 кс) [1]. При этих параметрах происходит образование малосвязанных агломератов, состоящих из частиц с меньшим размером. В результате исследований показано, что легирующие добавки влияют на процессы измельчения и агломерации, определяющие особенности формирования холоднопрессованных заготовок и горячедеформированных порошковых материалов с повышенными физико-механическими свойствами [2]. Введение 2-6% масс. Ni повышает микротвердость и прочность при испытаниях на многоцикловую усталость [3].

Цель работы: установить закономерности влияния содержания порошка никеля на кинетику размола, физико-механические свойства горячедеформированных порошковых материалов на основе механически активированной стружки Д-16.

Методика проведения исследований. В качестве исходных материалов использовали: стружку алюминиевого сплава Д-16 толщиной 0,5-1,0 мм и шириной 1-5 мм, полученную в процессе токарной обработки, никель ПНК-УТ1 (ГОСТ 9722-97), борную кислоту (ГОСТ 18704-78), порошок алюминия (ПА-4, ГОСТ 6058-73). При исследовании влияния времени размола τ_p (1,8-14,4 кс) на гранулометрический состав измельченной стружки в шихту вводили 0-6% масс. никеля, а также насыщенный водный раствор борной кислоты

(20% от массы шихты) для защиты от окисления материала стружки Д-16 [1, 2].

МХА стружки проводили в шаровой планетарной мельнице САНД-1 при частоте вращения ротора 290 мин⁻¹ и соотношении масс шаров ($d_{\text{шаров}} = 10$ мм) и шихты $M_{\text{шаров}}:m_{\text{шихты}} = 10:1$. Ситовый анализ проводили в соответствии с ГОСТ 18318-94, с последующей обработкой в ступе (0,9 кс) и разделением по фракциям +630 и -630 мкм. Часть активированной шихты смешивалась с порошком алюминия (ПА) в соотношении 50:50.

Холодное прессование производили на гидравлическом прессе ПГ-50 (455 МПа). Предварительный нагрев (550°C, 0,15 кс) проводили в электрической печи, с последующим динамическим горячим прессованием на копре с массой падающих частей 50 кг с приведенной энергией 140 МДж/м³. Были проведены исследования механических свойств горячепрессованных образцов. Твердость образцов замерялась по Роквеллу на твердомере 5006 УХЛ42 по шкалам HRE (нагрузка – 980,7 Н и диаметр индентора – 3,175 мм). Исследование предела прочности на срез проводилось в специальном устройстве на разрывной машине.

Результаты экспериментальных исследований

Построены 3-D Spline модели зависимостей выхода фракций +630 мкм от времени размола (τ_p) и концентрации никеля (C_{Ni}) и изолинии ΔR_{+630} , % масс. Анализ моделей зависимостей влияния концентраций никеля и времени размола τ_p на выход фракций +630 мкм (рис. 1) показал, что введение добавок интенсифицирует процесс измельчения. Минимальное значение выхода фракций размером +630 мкм обеспечивается при повышенной концентрации добавок (6% масс.) и времени обработки (14,4 кс).

Для оценки степени агломерации порошковой шихты при ее механической активации определяли показатель агломерации (ПАГ) (рис. 2) по формуле

$$ПАГ = \frac{d_0}{d_1},$$

где d_0 – средний размер частиц после МХА; d_1 – средний размер частиц после ручной обработки в ступе.

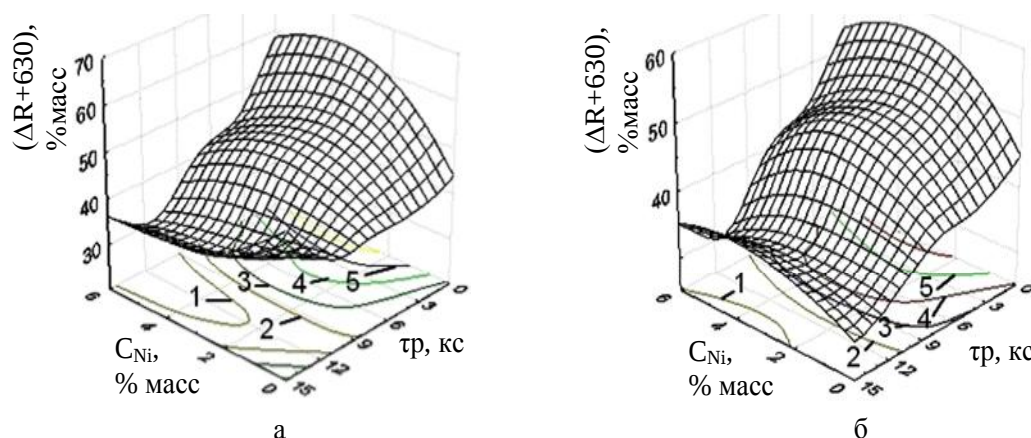


Рис. 1. 3-D Spline модели зависимостей выхода фракций +630 мкм от времени размола (t_p) и концентрации никеля (C_{Ni}) и изолинии $\Delta R + 630, \% \text{ масс}$ (1 – 35...40, 2 – 40...45, 3 – 45...50, 4 – 45...50, 5 – 50...55):
а – после МХА, б – после МХА и РО

Введение никеля изменяет средний размер частиц. Переход от диспергирования к агломерации в процессе МХА наблюдался при 2% никеля. При введении 4% никеля степень агломерации плавно снижается до 6%.

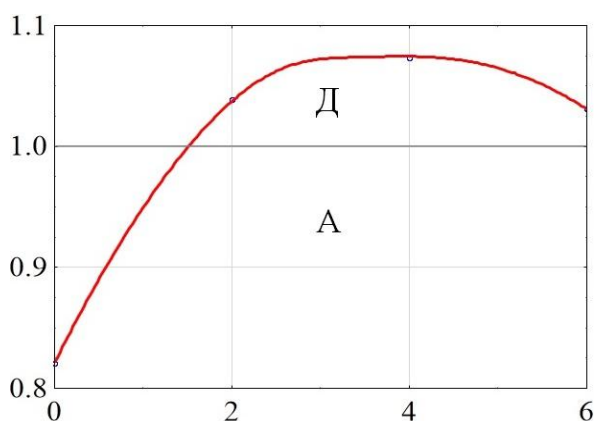


Рис. 2. Зависимость ПАГ от концентрации никеля

Исследования плотности и механических свойств представлены в таблице.

При введении никеля до 4% происходит снижение плотности холоднопрессованной заготовки на основе стружкового порошка фракцией -630 мкм. Минимальные значения плотности холоднопрессованной заготовки для материала, легированного никелем, наблюдается при 4% масс., а дальнейшее увеличение концентрации никеля приводит к повышению плотности заготовки.

Максимальное значение плотности горячедеформированного порошкового материала (ГДПМ) на образцах на основе смеси МХА стружкового порошка с добавлением порошка алюминия наблюдается на основе шихт, полученных при времени размола 3,6 кс и 6% легирующего элемента ($2,96 \text{ г/см}^3 - ((-630) + \text{ПА})$). Введение порошка алюминия снижает плотность горячедеформированного материала. Минимальное

значение плотности $2,41 \text{ г/см}^3$ наблюдается на образце на основе стружкового порошка (10,8 кс, 0% масс Ni (-630)).

Проведенный анализ экспериментальных данных твердости ГДПМ показал, что максимальные значения твердости имеют образцы, полученные из стружкового материала с размером частиц -630 мкм при времени МХА 1,8 кс при концентрации легирующего элемента 4% масс. Наименьшая твердость образцов на основе материала ((+630)+ПА) – при времени обработки 10,8 кс и концентрации никеля 6% масс. Максимальное значение предела прочности на срез (214 МПа) наблюдается на образцах с содержанием легирующего элемента 2% масс. из чистого стружкового материала с временем МХА 7,2 кс. Проанализировав таблицу, можно сделать вывод, что максимальные значения механических свойств образцов (твердость и предел прочности на срез) достигаются на образцах из чистого стружкового материала с размером частиц -630 мкм, порошок алюминия значительно снижает эти значения.

Выводы

Оптимизировано содержание легирующих элементов (6% масс.) и время размола (14,4 кс), обеспечивающие максимальный выход фракций размером менее 63 мкм. Построены 3D Spline модели зависимостей выхода фракций +630 мкм от времени размола и концентрации легирующих элементов. Выявлено влияние времени размола и концентрации легирующих элементов на механические свойства образцов.

Минимальные значения плотности холоднопрессованной заготовки для материала, легированного никелем, наблюдается при 4% масс., а дальнейшее увеличение концентрации никеля приводит к повышению плотности заготовки. Максимальные значения твердости горячедеформированного материала имеют образцы, полученные из стружкового материала при времени МХА 1,8 кс при концентрации легирующего элемента 4% масс.

Плотность, прочность и предел прочности на срез
горячедеформированного материала

Время обра- ботки, кс	Сл.э., % от массы струж- ки	(+630)+ПА			(-630)+ПА			(+630)			(-630)		
		ρ _{гш} , г/см ³	HRE	Тср, МПа	ρ _{гш} , г/см ³	HRE	Тср, МПа	ρ _{гш} , г/см ³	HRE	Тср, МПа	ρ _{гш} , г/см ³	HRE	Тср, МПа
1,8	0	2,66	66	110	2,64	85	144	2,70	91	145	2,79	115	188
	2	2,61	83	121	2,52	83	98	2,71	98	145	2,67	110	141
	4	2,64	79	102	2,64	83	123	2,72	98	155	2,91	119	147
	6	2,68	77	110	2,61	79	106	2,76	100	204	2,87	118	98
3,6	0	2,68	79	80	2,66	87	149	2,73	100	110	2,67	110	94
	2	2,65	88	104	2,47	81	98	2,70	98	98	2,63	108	141
	4	2,69	86	131	2,71	89	126	2,72	99	100	2,73	111	-
	6	2,70	73	131	2,96	96	163	2,90	99	153	2,78	109	90
5,4	0	2,76	80	113	2,68	93	141	2,64	102	186	2,83	113	149
	2	2,69	86	106	2,61	92	147	2,74	97	163	2,78	107	-
	4	2,70	91	94	2,63	89	100	2,92	97	157	2,57	99	-
	6	2,72	59	98	2,68	92	147	2,75	95	139	2,56	101	-
7,2	0	2,70	83	112	2,63	90	170	2,74	102	129	2,57	111	152
	2	2,71	58	108	2,84	88	141	2,70	100	149	2,64	107	214
	4	2,72	87	114	-	88	155	2,65	100	145	2,57	105	129
	6	2,71	84	125	2,69	99	168	2,77	99	145	2,56	100	180
10,8	0	2,66	77	110	2,76	88	143	2,70	83	104	2,41	71	-
	2	2,70	90	118	2,68	89	151	2,72	102	86	2,52	113	139
	4	2,73	97	133	2,64	91	151	2,80	99	86	2,45	107	78
	6	2,69	62	112	2,70	88	159	2,68	100	116	2,62	110	163
14,4	0	2,76	90	88	2,68	84	112	2,64	101	96	2,52	108	112
	2	2,65	89	125	2,71	92	153	2,71	97	155	2,72	108	-
	4	2,71	60	133	2,74	94	168	2,71	91	196	2,66	105	112
	6	2,70	71	123	2,64	90	149	2,76	96	137	2,55	105	-

Максимальные значения механических свойств образцов (твердость и предел прочности на срез) достигаются на образцах из чистого стружкового материала с размером частиц - 630 мкм, порошок алюминия значительно снижает эти значения.

Установлен переход от диспергирования к агломерации при введении 2% масс. легирующих элементов и времени размола 14,4 кс. Показано, что введение легирующих элементов изменяет средний размер частиц, при увеличении до 2% легирующих элементов наблюдается интенсивное снижение размера частиц.

Список литературы

1. Безбородов Е. Н. Горячедеформированные порошковые материалы на основе механохимически активированного «стружкового» порошка Д-16: автореф. ... канд. техн. наук / ЮРГТУ (НПИ). Новочеркасск, 2003. 25 с.
2. Дорофеев Ю.Г., Безбородов Е.Н., Сергеев С.Н. Особенности формирования компактированного материала из механически активированной стружки алюминиевого сплава Д16 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2003. №2. С. 31-33.
3. Материалы, получаемые методами порошковой металлургии из быстрозакаленных чешуек алюминиевого сплава 2024, содержащего переходные металлы / Lim Sugun, Sugamata Makoto, Kaneko Junichi. // Кэйкиндзоку, J. Jap. Inst. Light Metals. 1987, 37, №10, 690-697 (яп.; рез. англ.)

Сведения об авторе

Слабкий Дмитрий Васильевич – аспирант Южно-Российского государственного технического университета (Новочеркасский политехнический институт). E-mail: dmitrii666s@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

MECHANICAL PROPERTIES OF HOT DEFORMED MATERIALS BY MECHANICALLY
ACTIVATED ALUMINUM CHIPS D-16

Slabkiy Dmitry Vasilievich – a postgraduate student, South Russian State Technical University (Novocherkassk Polytechnic Institute). E-mail: dmitrii666s@mail.ru.

Abstract. The effect of nickel (0-6% mass) concentration in the charge and the grinding time on the material's granulometric composition and its mechanical properties based on ground chips D-16 have been studied. Nickel contents and grinding time providing maximum output of fractions with size of -63 microns have been optimized as well as the best mechanical properties of materials.

Keywords: ground chips D-16, mechanical and chemical activation, grinding.

References

1. Bezborodov E.N. Hot-powder materials based on mechanically activated chips powder D-16. Abstract. Novocherkassk, 2003, 25 p.
2. Dorofeyev J.G., Bezborodov E.N., Sergeenkov S.N. Osobennosti formirovaniya kompaktirovannogo materiala iz mekhanicheski aktivirovannoj struzhki alyuminievogo splava D16 [Features of the formation of the compacted material from mechanically activated aluminum chips D16]. *Metallurgy and heat treatment of metals*. 2003, no. 2, pp. 31-33.
3. Lim Sugun, Sugamata Makoto, Kaneko Junichi. Materials obtained by powder metallurgy methods of rapidly quenched alloy 2024 aluminum flake containing transition metals. *Keykindzoku, J. Jap. Inst. Light Metals*. 1987, 37, no. 10, 690-697 (Jap.; res. Eng.).

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.778.1.014-426

Харитонов В.А., Усанов М.Ю.

СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ СПОСОБОВ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ КРУГЛОЙ ПРОВОЛОКИ

Аннотация. Методы интенсивной пластической деформации позволяют формировать в металлах ультрамелкозернистую структуру. Эти методы имеют дискретный характер и практически не применимы при производстве длинномерных изделий, таких как проволока. В работе проведен анализ комбинированных методов деформации. Показано, что одним из перспективных методов является радиально-сдвиговая протяжка.

Ключевые слова: наноструктурирование, равноканальное угловое прессование, проволока, радиально-сдвиговая протяжка, deform 3d.

Одним из важнейших видов метизов является стальная проволока, широко используемая как конструктивный элемент при производстве канатов, биметаллической сталемедной проволоки и неизолированных проводов и т.д. Данные металлоизделия определяют безопасность и надежность функционирования железных дорог, агрегатов для подъема (перемещения) людей или грузов, несущих строительных конструкций объектов и сооружений, телефонных проводов, специальных микрокабелей, авиа- и сейсмографических кабелей, компонентов электронной техники, объектов оборонной промышленности, авиации и др. Основными показателями качества указанных металлоконструкций являются их надежность и долговечность, определяемые, главным образом, прочностными свойствами стальной проволоки [1]. Основные свойства проволоки как конструкционного материала: пределы прочности, текучести, усталости; износостойкость; вязкость разрушения являются структурно-чувствительными, т.е. могут управляться посредством целенаправленного изменения структуры, в частности изменением номенклатуры и концентрации структурных дефектов, размеров зерен, ячеек и других субструктурных единиц [2, 3].

Материалы с ультрамелкозернистой (УМЗ) и наноструктурой обладают уникальными свойствами. Например, прочность металла с наноструктурой в 1,5-2,0 раза, а в некоторых случаях в 3,0 раза, выше, чем у обычного металла, твердость больше в 50-70 раз [4]. В таких материалах изменяются также упругие модули, температуры Кюри и Дебая, намагниченность насыщения и т.д. Это открывает перспективы улучшения существующих и создания принципиально новых конструкционных материалов. Нанокристаллические материалы обеспечивают оптимальное сочетание прочностных и пластических свойств. Причем положительный эффект достигается не за счет дорогостоящих легирующих компонентов, а только за счет изменения структуры. Это приводит к улучшению многих технико-экономических показателей и обеспечивает низкую материалоемкость и энергоемкость про-

изводства в расчете на одно готовое изделие, снижение сырьевой зависимости и транспортных расходов, экологическую чистоту [3].

Для получения субмикро- и нанокристаллической структур обязательно необходимо сочетание двух факторов – высокой интенсивности и существенной немоности деформации, осуществляемой при температурах не выше температуры протекания процессов возврата.

Первый процесс обеспечивает необходимое генерирование дислокаций и эволюцию дислокационной структуры, а второй – активацию новых решеточных дислокаций и их взаимодействие с образующимися при деформации малоугловыми границами фрагментов, что приводит к их перестройке в высокоугловые границы общего типа. Развитие такого рода структурных процессов возможно при сохранении сплошности материала, что достигается гидростатическим давлением [5].

Для формирования субмикро- и наноструктуры в металлах и сплавах широко применяют методы интенсивной пластической деформации (ИПД). Методы ИПД можно разделить на две группы и охарактеризовать степенью охвата очагом деформации объема заготовки [6]. К первой группе относятся методы, в которых заготовка по всей длине и всему объему одновременно подвержена деформированию [7, 8], в эту группу входят всесторонняя изотермическая ковка и кручение под давлением. Ко второй группе относятся схемы, где очаг деформирования последовательно проходит вдоль одной из осей заготовки [9-11], к этой группе относятся РКУП и винтовая экструзия. Охват всего объема заготовки очагом деформации влияет на равномерность напряженного состояния по объему и служит основой для получения заготовок с одинаковыми механическими свойствами в разных сечениях и повышения коэффициента использования металла. К отличительным особенностям этих методов относят, прежде всего, накопление в заготовке большой степени деформации без изменения геометрических размеров. Также эти методы ИПД имеют дискретный характер, что не позволяет использовать их в непрерывных процессах.

Для производства длинномерных изделий с мелкозернистой структурой предложены комбинированные методы. Методы, основанные на изгибе: РКУП-«Конформ» [12], многократное угловое накопительное волочение (AAD) [13], способ получения длинномерных заготовок круглого поперечного сечения с УМЗ структурой [14]. И методы, основанные на кручении: волочение со сдвигом [15], непрерывное деформационное наноструктурирование проволоки [16]. На наш взгляд, при производстве длинномерных изделий нецелесообразно использовать методы, основанные на изгибе из-за несовершенства оснастки и сложности встраивания его в действующее оборудование. Наиболее перспективны методы, основанные на кручении. Предложенный Чукиным М.В. и др. способ непрерывного деформационного наноструктурирования проволоки [16] использует дополнительную сдвиговую деформацию путем знакопеременного изгиба и кручения. Оборудование для реализации этого способа хорошо встраивается в линию волочильной машины. Однако данный способ требует дополнительного оборудования, а степень накопленной деформации сдвига ограничивается высокой вероятностью разрушения металла при кручении. В способе, предложенном Раабом Г.И., осуществляется волочение проволоки со сдвигом в двух последовательно расположенных волоках, внутренний канал которых выполнен в виде смещенного конуса, причем волока на выходе вращается вокруг своей оси [15]. Применение способа в промышленных условиях ограничивается сложностью изготовления волок.

На наш взгляд, всем требованиям к формированию УМЗ структуры отвечает радиально-сдвиговая прокатка (РСП) [17]. РСП определяется как частный случай винтовой прокатки с повышенными углами подачи и совмещает деформации формоизменения и сдвига кручением [18]. Исследования, проводимые в МИСиС на протяжении ряда лет, и накопленный опыт промышленного внедрения убедительно доказали весьма высокую эффективность применения принципа винтовой прокатки для получения сплошных круглых профилей практически из любых деформируемых металлов [17]. На основе конструктивно больших углов подачи создана и успешно эксплуатируется серия типовых трехвалковых станков радиально-сдвиговой прокатки (РСП), позволяющая получать высококачественный прокат сечений больше среднего с высокой степенью деформации [19].

Непрерывно-дискретный характер деформирования, создавая локализованную контактную поверхность с валками, ограничивают уровень усилий, момента и мощности прокатки. Геликоидальное истечение металла в очаге деформации по заданным траекториям с замедлением внешних слоев заготовки и ускорением внутренних создает эффект объемного макросдвига. Металл глубоко уплотняется и прорабатывается по всем уровням металлофизического строения. Элементы структурного строения металла приобретают форму изотропных обособленных частиц высокой дисперсности, при этом происходит комплексное повышение и стабилизация физико-

механических и служебных свойств металла. Непрерывно-дискретный характер деформирования, создавая локализованную контактную поверхность с валками, ограничивают уровень усилий, момента и мощности прокатки. При сопоставимых обжатиях уровень энергосиловых параметров при РСП в 12-15 раз ниже, чем при продольной. Соответственно снижается металлоемкость оборудования и мощность главных приводов [18]. Однако при данном способе происходит кручение заготовки, что делает невозможным его применение для обработки длинномерных изделий.

Также для производства сортового металла исследовалась планетарная прокатка [19]. Но она не нашла широкого применения в промышленности из-за ряда недостатков, таких как сложность технологического процесса и несовершенство оборудования.

Однако попытка прямым масштабированием распространить серию РСП на область мелких сечений проката (диаметром ≤ 50 мм) не дала промышленного результата. Обнаружилась неадекватность объемной компоновки разработанных станков крайне ограниченному пространству вокруг прутка малого сечения [19].

Для применения радиально-сдвиговой деформации при производстве проволоки на кафедре машиностроительных и металлургических технологий МГТУ им Г.И. Носова был предложен способ, получивший название «радиально-сдвиговая протяжка» (РСПр) [2, 20]. Радиально-сдвиговая протяжка основана на принципах радиально-сдвиговой прокатки. РСПр осуществляется приложением к проволоке (катанке) переднего тянущего усилия без ее скручивания.

Установка радиально-сдвиговой протяжки представляет собой кассету с 3-мя неприводными роликами, расположенными под углом 120° друг к другу, с углами подачи $\beta > 16^\circ$. Каждый ролик имеет рабочий конус и калибрующий пояс [2]. Процесс радиально-сдвиговой протяжки обеспечивает одновременно деформацию и измельчение структуры. Отличительной особенностью процесса РСПр является то, что его можно осуществлять на действующих волочильных машинах, устанавливая вместо волокодержателя кассету радиально-сдвиговой протяжки.

Для изучения процесса РСПр была спроектирована и изготовлена рабочая кассета. Результаты лабораторных исследований представлены в работе [21].

Также было проведено моделирование РСПр в программном комплексе Deform 3D [22, 23] и показано формирование спиралевидной структуры по сечению проволоки [24]. Моделирование проводилось с некоторыми упрощениями и допущениями: протяжку считали холодной (принималась температура заготовки 20°C); трение по всей поверхности контакта с рабочими роликами подчинено закону трения по Зибелю, при этом коэффициент трения постоянен по всей контактной поверхности; рабочие ролики рассматривались как абсолютно жесткие тела; угол подачи роликов – 20° ; угол конической части роликов – 4° .

В процессе моделирования было установлено, что угол скручивания γ зависит от вытяжки и обжатия. С увеличением вытяжки и обжатия угол скручивания уменьшается, т.е. подобно виткам пружины плотность

навивки становится больше.

При этом структурообразование зависит не только от тензора деформации, но и от тензора поворота, которые в совокупности представляют собой тензор дисторсии. Полная структурообразующая деформация включает в себя деформационный сдвиговой компонент и ротационный компонент. Таким образом, общая величина накопленной деформации определяется как сумма линейной деформации вытяжки и деформации скручивания по выражению [25]:

$$e = 2 \ln \left(\frac{d_0}{d} \right) + \ln \left(\frac{90}{\gamma} \right).$$

Например, если нанести риску на поверхность проволоки и проволочить ее, то риска на поверхности останется параллельно оси проволоки (рис. 1, а), угол скручивания γ будет равен 90 град. Если проволоку подвергнуть радиально-сдвиговой деформации, то риска приобретет вид спирали и угол γ уже не будет равен 90 град (рис. 1, б).

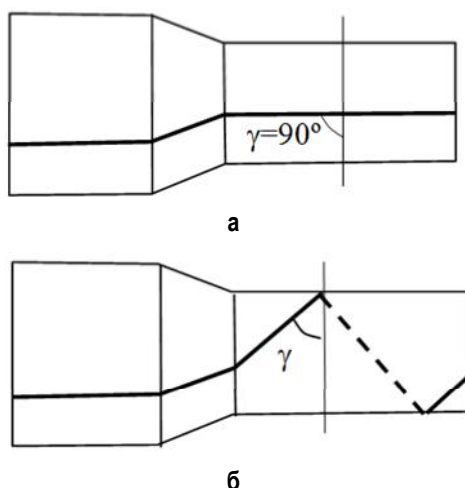


Рис. 1. Траектории течения металла: а – при волочении, б – при радиально-сдвиговой протяжке

Особый интерес представляет комбинирование радиально-сдвиговой протяжки и волочения в монолитной волоке. Для этого было проведено сравнительное моделирование получения проволоки по маршруту 16,00-14,25-12,85-11,73-10,80-10,00 мм, с различной комбинацией расположения монолитных волок и волок РСПр и направлением вращения последних (см. таблицу).

Комбинированные маршруты получения проволоки

1 маршрут	РСПр (л)	РСПр (л)	РСПр (л)	м.в.	м.в.
2 маршрут	РСПр (л)	РСПр (п)	РСПр (л)	м.в.	м.в.
3 маршрут	РСПр (л)	РСПр (п)	РСПр (п)	м.в.	м.в.
4 маршрут	РСПр (л)	м.в.	РСПр (п)	м.в.	м.в.
РСПр (л) – вращение РСПр влево. РСПр (п) – вращение РСПр вправо.					
м.в. – волочение в монолитной волоке.					

Зависимости изменения углов скручивания в различных комбинированных маршрутах приведены на рис. 2.

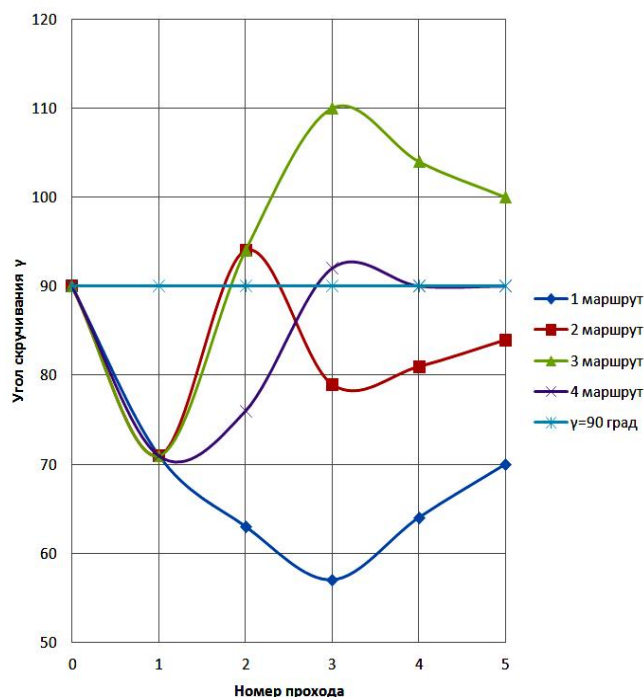


Рис. 2. Изменение угла скручивания в различных комбинированных маршрутах

Из рис. 2 видно, что в первом проходе угол скручивания составляет 71°. При дальнейшем волочении угол скручивания увеличивается до 76 град (т.е. спираль выпрямляется). При РСПр в том же направлении угол скручивания уменьшится до 63 град, а при РСПр в противоположном направлении – до 94 град, т.е. закрутится в обратном направлении.

При волочении по маршруту №4 сначала образуется спираль, а при дальнейшем волочении и реверсивной РСПр спираль меняет направление свивки и после волочения в монолитных волоках в двух последних проходах винтовая линия превращается в прямую, как до первого прохода.

В работах [26, 27] показано, что расстояние между пластинками цемента (S) при волочении в монолитных волоках непрерывно уменьшается при увеличении суммарной степени деформации или межпластиночное расстояние уменьшается пропорционально

диаметру проволоки d , $\frac{S}{S_0} = \frac{d}{d_0}$ (S – межпластиночное расстояние в готовой проволоке после обработки; d – диаметр готовой проволоки после обработки S_0 – межпластиночное расстояние при начальном диаметре проволоки d_0).

Для оценки изменения межпластиночного расстояния при радиально-сдвиговой протяжке предложена формула:

$$\gamma = 90 \cdot \left(\frac{S \cdot d_0}{S_0 \cdot d} \right)^2,$$

где γ – величина угла подъема винтовой линии вращения.

Например, при волочении по вышеприведенному маршруту исходной патентованной заготовки из стали марки 70 с межпластиночным расстоянием 180 нм была получена проволока с межпластиночным расстоянием 112,5 нм, а после радиально-сдвиговой протяжки межпластиночное расстояние было равно 87,2 нм, т.е. меньше в 1,3 раза. Соответственно во столько же раз возрасла прочность готовой проволоки. Для получения радиально-сдвиговой протяжки проволоки с прочностью, равной волоченой проволоки, можно использовать заготовку 12,5 мм, что значительно снижает затраты на патентирование и волочение проволоки.

Таким образом, радиально-сдвиговая протяжка является эффективным способом получения проволоки с УМЗ структурой. Он не меняет сути используемого технологического и может быть просто реализован на применяемом сегодня волочильном оборудовании. Одновременное действие двух механизмов формирования структуры и возможности управления ими позволяют получать проволоку с требуемой микроструктурой при одновременном снижении затрат на ее изготовление.

Список литературы

1. Чукин М.В., Полякова М.А., Емалева Д.Г. Деформационное наноструктурирование проволоки: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 57 с.
2. Совершенствование режимов деформации и инструмента при волочении круглой проволоки: монография / Харитонов В.А., Манякин А.Ю., Чукин М. В., Дремин Ю.А., Тикеев М.А., Усанов М.Ю. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 174 с.
3. Перспективные материалы. Структура и методы исследования: учеб. пособие / под ред. Д.Л. Мерсона. М.: ТГУ, МИСиС, 2006. 536 с.
4. Маврина Т.В. Наука «уходит» в наномир // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. №10. С.905-909.
5. Кечин В.А., Ваганов В.Е. Основные тенденции наноструктурированных материалов // Металлургия машиностроения. 2010. №2.
6. Алтухов А.В., Тарасов А.Ф., Периг А.В. Систематизация процессов интенсивного пластического деформирования для формирования ультрамелкозернистых и нанокристаллических структур в объемных заготовках // Письма о материалах. 2012. Т.2. С. 54-59
7. Пат. 2306997 Российская Федерация, МПК В21J5/06. Устройство для осадки со сдвигом заготовки / А.Д. Хван, Д.В. Хван, М.А. Дикарев [и др.]. № 2006107344; заявл. 09.03.2006; опубл. 27.09.2007. Бюл. № 27.
8. Пат. 2393936 Российская Федерация, МПК В21J5/06. Способ получения ультрамелкозернистых заготовок из металлов и сплавов / В.А. Шундалов, В.Ю. Иванов, В.В. Латыш [и др.]. №2009110937/02; заявл. 25.03.2010; опубл. 10.07.2010. Бюл. №54.
9. Пат. 2240197 Российская Федерация, МПК В21J5/00. Способ комбинированной интенсивной пластической деформации заготовок / Р.З. Валиев, Х.Ш. Салимгареев, Г.И. Рааб [и др.]. № 2002123183/02; заявл. 22.07.2003; опубл. 20.11.2004. Бюл. № 23.

10. Пат. 2282515 Российская Федерация, МПК В21С25/00. Устройство для обработки металлов давлением / А.М. Иванов, Р.З. Валиев, Г.И. Рааб, Е.С. Лукин. № 2004125214/02; заявл. 17.08.2004; опубл. 27.08.2006. Бюл. № 24.
11. Пат. 2237109 Российская Федерация, МПК С1С22F1/18. Способ получения ультрамелкозернистых титановых заготовок / Р.З. Валиев, Х.Ш. Салимгареев, В.В. Столяров, [и др.]. №2003113094/02; заявл. 05.05.2003; опубл. 27.09.2004. Бюл. № 21.
12. Утяшев Ф.З. Современные методы интенсивной пластической деформации: учеб. пособие / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа, 2008. 313 с.
13. Влияние изменения вида деформации на неоднородность микроструктуры и механические свойства волоченной проволоки. Influence of strain changes on microstructure inhomogeneity and mechanical behavior of wire drawing products / Muszka K., Wielgus M., Doniec K., Stefanska-Kadziela M. // Mater. Sci. Forum. 2010. 654. С. 314-317. Англ.
14. Пат. 2446027 Российская Федерация, МПК В21С1/00. Способ получения длинномерных заготовок круглого поперечного сечения с ультрамелкозернистой структурой / М.В. Чукин, Д.Г. Емалева, М.П. Барышников, М.А. Полякова. №2010122148/02; заявл. 31.05.2010; опубл. 27.03.2012. Бюл. № 9.
15. Пат. 2347632 Российская Федерация, МПК В21С 1/00. Устройство для волочения и получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов / Г.И. Рааб, А.Г. Рааб. №2007141898/02; заявл. 12.11.2007; опубл. 27.02.2009. Бюл. № 6.
16. Пат. 2467816 Российская Федерация, МПК В21С 1/04. Способ получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением с кручением / М.В. Чукин, М.А. Полякова, Э.М. Голубчик [и др.]. № 2011107637/02; заявл. 28.02.2011; опубл. 27.11.2012. Бюл. № 33.
17. Потапов И.Н., Полухин П.И. Технология винтовой прокатки. М.: Металлургия, 1990. 344 с.
18. Прогрессивные технологии ОМД. М.: ИРИАС, 2009. 600 с.
19. Технология и мини-станы винтовой прокатки - новое решение в технике для производства круглых профилей мелких и средних сечений / С.П. Галкин, В.К. Михайлов, Б.А. Романцев // Пластическая деформация сталей и сплавов: сб. науч. тр. М.: Изд-во МИСиС, 1996. С. 249-254.
20. Манякин А.Ю. Повышение эффективности технологических процессов производства проволоки на основе совершенствования деформационных режимов волочения: автореф. дис. ...канд. техн. наук. Магнитогорск, 2006. 20 с.
21. Харитонов В.А., Полякова М.А., Усанов М.Ю. Радиально-сдвиговая протяжка как эффективный способ повышения качества круглой проволоки // Труды научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР». Т. 2. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. С. 521-532.
22. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Моделирование процесса радиально-сдвиговой протяжки // Материалы 68-й межрегиональной научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2010. Т. 1. С. 46-48.
23. Усанов М.Ю. Моделирование в программном комплексе Deform 3d процессов волочения и радиально-сдвиговой протяжки проволоки // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Салганика. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2012. С. 80-85.
24. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Модель формирования наноструктуры в высокоуглеродистой проволоке в процессе радиально-сдвиговой протяжки // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: междуз. сб. науч. тр. / под общ. ред. В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. Тверь: Твер. гос. ун-т, 2012. Вып. 4. С. 309-313.
25. Теплая поперечно-винтовая прокатка в вальках конической формы как метод интенсивной пластической деформации / М.Б. Иванов, А.В. Пенкин и др. // Деформация и разрушение материалов. 2010. №9. С. 13-18.
26. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные материалы: получение, структура и свойства. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 398 с.
27. Embury J. D., Fisher R. M. // Acta. Metall. 1966, vol. 14, pp. 147-159.

Сведения об авторах

Харитонов Вениамин Александрович – канд. техн. наук, проф. кафедры машиностроительных и металлургических технологий ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел. 8(3519) 29-84-81.

Усанов Михаил Юрьевич – ст. преп. кафедры металлургии и стандартизации филиала ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Белорецк. E-mail: barracuda_m@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

STATE AND WAYS OF CONTINUOUS METHOD DEVELOPMENT FOR ROUND WIRE NANOSTRUCTURING

Kharitonov Veniamin Alexandrovich – Ph.D. (Eng.), professor, Mechanical Engineering and Metallurgical Technologies department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Phone: 8(3519) 29-84-82.

Usanov Mikhail Yuryevich – assistant professor, Metallurgy and Standardization department, Nosov Magnitogorsk State Technical University Branch, Beloretsk. E-mail: barracuda_m@mail.ru.

Abstract. Intensive plastic deformation methods allow to form ultrafine-grained structure in metals. These methods are of discrete nature and they are not practically applicable for production of elongated articles such as wire. The paper analyzes the combined methods of deformation. It is shown that one of the promising methods is the radial displacement broach.

Keywords: nanostructuring, equal channel angular pressing, wire, radial-displacement broach, deform 3d.

References

1. Chukin M.V., Poljakova M.A., Emaleeva D.G. *Deformatsionnoe nanostrukturirovanie provoloki* [Strain nanostructuring wire]. Magnitogorsk, 2012, 57 p.
2. Kharitonov V.A., Maniakin A.Yu., Chukin M.V., Dremir Yu.A., Tikeev M.A., Usanov M.Yu. *Sovershenstvovanie rezhimov deformatsii i instrumenta pri volochenii krugloj provoloki : monografiya* [Improving the deformation modes and tools for drawing round wire]. Magnitogorsk, 2011, 174 p.
3. *Perspektivnye materialy. Struktura i metody issledovaniya* [Advanced materials. The structure and methods research]. Ed. D.L. Merson. Moscow: TSU, MISA, 2006. 536 p.
4. Mavrina T.V. Science is «leave» in the nanoworld. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences]. 2002, vol. 72, no. 10. pp. 905-909.
5. Kechin V.A., Vaganov V.E. Main trends of nanostructured materials. *Metallurgiya mashinostroeniya* [Metallurgy Engineering]. 2010, no. 2.
6. Altukhov A.V., Tarasov A.F., Perig A.V. Systematization of intense plastic deformation processes for the formation of ultrafine-grained and nanocrystalline structures in three-dimensional workpieces. *Pis'ma o materialakh* [Letters of Materials]. 2012, vol. 2, pp. 54-59.
7. Khvan A.D., Khvan D.V., Dikarev M.A., Gorjachev A.A., Bakhmatov S.I., Sokolova O.A., Popov A.V. *Ustrojstvo dlya osadki so sdvigom zagotovki* [Apparatus for upsetting blank at shearing it]. Patent of RF, no. 2306997, 2007.
8. Shundalov V.A., Ivanov V.Ju., Latysh V.V., Mikhailov I.N., Pavlinich S.P., Sharafutdinov A.V. *Sposob polucheniya ul'tramelkozernistykh zagotovok iz metallov i splavov* [Method of producing ultra-fine-grain billets from metals and alloys]. Patent of RF, no. 2393936, 2010.
9. Valiev R.Z., Salimgareev Kh.Sh., Raab G.I., Krasilnikov N.A., Amirkhanov N.M. *Sposob kombinirovannoj intensivnoj plasticheskoy deformatsii zagotovok* [Method for combination type intensified plastic deformation of blanks]. Patent of RF, no. 2240197, 2004.
10. Ivanov A.F., Valiev R.Z., Raab G.I., Lukin E.S. *Ustrojstvo dlya obrabotki metallov davleniem* [Apparatus for plastic deforming of materials]. Patent of RF no. 2282515, 2004.
11. Valiev R.Z., Salimgareev Kh.Sh., Stoljarov V.V., Beygelzimer Y.E., Orlov D.V., Synkov S.G., Reshetov A.V. *Sposob polucheniya ul'tramelkozernistykh titanovykh zagotovok* [Method for producing of ultra fine-grained titanium blanks]. Patent of RF no. 2237109, 2004.
12. Utyashev F.Z. *Sovremennye metody intensivnoj plasticheskoy deformatsii* [Modern methods of severe plastic deformation]. Ufimsk. State. Aviation. Tehn. Univ. Ufa, 2008. 313 p.
13. Muszka K., Wielgus M., Doniec K., Stefanska-Kadziela M. Effect of change in the type of deformation on the heterogeneity of the microstructure and mechanical properties of the wire drawing. Influence of strain changes on microstructure inhomogeneity and mechanical behavior of wire drawing products. *Mater. Sci. Forum*. 2010, 654, pp. 314-317. English.
14. Chukin M.V., Emaleeva D.G., Baryshnikov M.P., Poljakova M.A. *Sposob polucheniya dlinnomernykh zagotovok kruglogo poperechnogo secheniya s ul'tramelkozernistoj strukturoj* [Method of producing long round billets with ultrafine granular structure]. Patent of RF, no. 2446027, 2012.
15. Raab G.I., Raab A.G. *Ustrojstvo dlya volocheniya i polucheniya ul'tramelkozernistykh polufabrikatov* [Device for drawing and production of ultrafine-grained semi-finished products]. Patent of RF, no. 2347632, 2007.
16. Chukin M.V., Poljakova M.A., Golubchik E.M., Rudakov V.P., Noskov S.E., Gulina A.E. *Sposob polucheniya ul'tramelkozernistykh polufabrikatov volocheniem s krucheniem* [Method of making ultrafine semis by drawing with twisting]. Patent of RF, no. 2467816, 2012.
17. Potapov I.N., Polkhin P.I. *Tekhnologiya vintovoj prokatki* [Technology screw rolling]. Moscow: Metallurgy, 1990. 344 p.
18. *Progressivnye tekhnologii OMD* [Progressive metal forming technology]. Moscow. IRIAS, 2009, 600 p.
19. Galkin S.P., Mikhailov V.K., Romancev B.A. Technology and mini-screw rolling mills – a new solution in the art for the production of round profiles of small and medium-sized sections. *Plasticheskaya deformatsiya stalej i splavov* [Plastic deformation of steels and alloys: Collection of scientific papers]. Moscow: Publ. MISA, 1996, pp. 249-254.
20. Maniakin A.Yu. Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskikh protsessov proizvodstva provoloki na osnove sovershenstvovaniya deformatsionnykh rezhimov volocheniya: avtoref. dis. ...kand. tekhn. nauk. [Improving the efficiency of manufacturing processes by improving the wire deformation modes of drawing]. Extended abstract of Ph.D dissertation. Magnitogorsk, 2006, 20 p.
21. Kharitonov V.A., Poljakova M.A., Usanov M.Yu. Radial shear broach as an effective way to improve the quality of round wire. *Trudy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Problemy i perspektivy razvitiya metallurgii i mashinostroeniya s ispol'zovaniem zavershennykh fundamentalnykh issledovaniy i NIOKR»* [Materials of the scientific conference «Problems and prospects of development of metallurgy and engineering completed with the use of basic research and R & D»]. Yekaterinburg: Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 2011, vol. 2, pp. 521-532.
22. Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. Modeling of the radial-displacement broach. *Materialy 68-j mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Materials of the 68th inter-regional scientific and technical conference]. Magnitogorsk, 2010, vol. 1, pp. 46-48.
23. Usanov M.Yu. Modeling software package Deform 3d drawing processes and radial shear the wire. *Modelirovanie i razvitie protsessov obrabotki metallov davleniem: mezhdunar. sb. nauch. tr. / pod red. V.M. Salganika* [Modeling and development of metal forming processes: Intern. Collection of Scient.Articles]. Ed. V.M. Salganik. Magnitogorsk: MSTU named after G.I. Nosov, 2012, pp. 80-85.
24. Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. Model of nanostructure formation in high carbon wire in radial shear broach. *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov: mezhvuz. sb. nauch. tr* [Physico-chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials: Intern. Collection of Scient. Articles]. Ed. V.M. Samsonov, N.Y. Sdobnyakova. Tver: Tver. State. University Press, 2012, vol. 4, pp. 309-313.
25. Ivanov M.B., Penkin A.V. etc. Warm helical rolling in conical rollers as a method of severe plastic deformation. *Deformatsiya i razrushenie materialov* [Deformation and fracture of materials]. 2010, no. 9. pp. 13-18.
26. Valiev R.Z., Alexandrov I.V. *Ob'emnye nanostrukturnye materialy: poluchenie, struktura i svoystva* [Bulk nanostructured materials: preparation, structure and properties]. Moscow: ICC «Akademkniga», 2007, 398 p.
27. Embury J.D., Fisher R.M. *Acta. Metall.* 1966, vol. 14, pp. 147-159.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

УДК 658.512

Дерябин И.П., Чабуркина А.С.

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ

Аннотация. При обработке точных и глубоких отверстий возникает проблема увода оси отверстия. В статье приводится пример применения новой методологии параметрического проектирования технологических процессов для обработки глубоких отверстий. Показано как на основе компьютерной отладки можно заданную точность обработки достигнуть за меньшее число переходов, что значительно снижает трудоемкость изготовления.

Ключевые слова: обработка глубоких отверстий, параметрическое проектирование, точности обработки, компьютерная отладка.

Обработка точных и глубоких отверстий является актуальнейшей проблемой современного машиностроения. При обработке таких отверстий, помимо сложностей отвода стружки и обеспечения стойкости инструмента, возникает еще проблема увода оси отверстия. В результате число операций и трудоемкость значительно возрастает. Анализ технологических процессов (ТП) обработки отверстий показывает, что комплексное выполнение всех параметров точности (диаметрального размера, формы и расположения оси) достигается с большим трудом, а количество выполняемых переходов, как правило, больше, чем необходимо для обработки других поверхностей аналогичной точности. Особенно это ярко проявляется при обработке отверстий, имеющих высокие требования сразу к нескольким параметрам точности. Невозможность комплексно обеспечить эти параметры точности концевыми мерными инструментами (КМИ), даже на современных многопозиционных и многоинструментальных станках с ЧПУ, приводит к необходимости применения операций координатного и алмазного растачивания, в результате число операций и трудоемкость значительно возрастают. Поэтому для разработки технологических процессов обработки таких отверстий необходимо применять другие принципы проектирования, основанные на новой методологии параметрического проектирования [1].

Рассмотрим применения новой методологии на примере обработки отверстия в детали «Корпус» (рис. 1).

Технологический процесс обработки отверстия по существующим методикам проектирования включает следующие переходы:

- 1) зацентровать отв.(1);
- 2) сверлить отв.(1) на глубину 58 мм, сверло $\varnothing 7$ мм;
- Переустановить
- 3) зацентровать отв.(1);
- 4) сверлить отв.(1) на глубину 50 мм, сверло $\varnothing 6,5$ мм;

- 5) зенкеровать отв.(1) предварительно на проход;
- 6) зенкеровать отв.(1) окончательно на проход;
- 7) развернуть отв.(1).

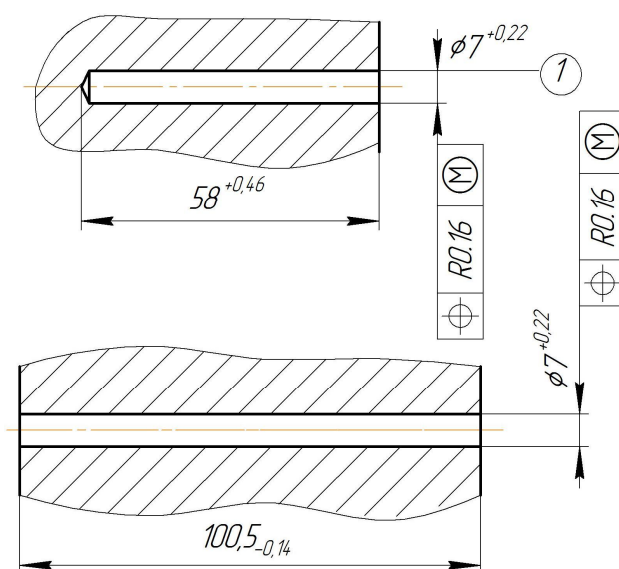


Рис. 1. Корпус

Данный технологический процесс составлен на основе возможностей обработки отверстий спиральными сверлами. Поэтому обработка отверстия выполняется с двух сторон из-за сложностей, связанных с отводом стружки. При этом в средней части отверстия образуется ступенька из-за возникающего увода сверл и разного их диаметра. Для устранения этой ступеньки и обеспечения допуска позиционного отклонения вводятся 2 перехода зенкерования и 1 переход развертывания. Необходимо отметить, что данная технология довольно распространена для обработки глубоких отверстий типовыми инструментами: спиральными сверлами, зенкерами и развертками. Повышенная трудоемкость

обработки по такой технологии связана с трудностями отвода стружки и возникающими уводами осей отверстий.

Теперь применим новую методологию параметрического проектирования технологических процессов. Для проектирования применялась специальная компьютерная программа отладки и проектирования технологических процессов обработки отверстия, разработанная на основе математических моделей формообразования [2, 3]. Выбираем вид обработки – сверление в сплошном материале, тип сверла – спиральное. Затем выбираем материал инструмента – однокоробидные твердые сплавы, а также материал детали – сплавы на титановой основе. После того, как выбор материала сделан, задаем исходные данные для моделирования (рис. 2). Параметры точности сверла задаем из технических условий для сверл нормальной точности по ГОСТ 2034-80: допуск на заточку угла при вершине $\pm 3^\circ$, допуск на осевое биение вершины режущей кромки – 0,2 мм. Далее задаем остальные параметры обработки: диаметр отверстия детали = 7 мм; верхнее отклонение – 0,22 мм; допуск увода оси отверстия – 0,16 мм; допуск формы – 0,11 мм и др.

Исходные данные	
Инструмент	
Диаметр	7,0
Верхнее отклонение	0,0
Нижнее отклонение	-0,03
Главный угол в плане	59,0
Допуск угла	3,0
Вылет инструмента	110,0
Осевое биение инструмента	0,2
Угол наклона винтовой канавки	30,0
Жёсткость	1,19
Угол наклона перемычки	55,0
Заготовка-Деталь	
Диаметр отверстия детали	7,0
Верхнее отклонение	0,22
Нижнее отклонение	0,0
Твердость материала	225,0
Допуск увода	0,16
Допуск формы	0,11
Условия обработки	
Длина обработки	100,0
Подача	0,12
Осевое биение шпинделя	0,05
Коэффициент резания K1	238,96
Коэффициент резания K2	763,22
Коэффициент резания KK1	390,23
Коэффициент резания KK2	407,69
Отмена Продолжение	

Рис. 2. Исходные данные для моделирования

В результате моделирования (рис. 3) получили, что увод и минимальный диаметр отверстия не в допуске. Расчетный увод 0,34 мм, а заданный – 0,16 мм. Расчетный минимальный диаметр 6,95 мм, а должен быть 7 мм. Параметры точности не соответствуют заданным, поэтому производим дальнейшую отладку в автоматическом режиме.

ИТОГОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ		
	Расчетные значения	Допускаемые значения
Увод оси	0.9383 мм	0.1600 мм
Отклонение от круглости	0.2054 мм	0.1100 мм
Разбивка отверстия	0.1480 мм	
Максимальный диаметр	7.147 мм	7.220 мм
Минимальный диаметр	6.764 мм	7.000 мм
РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СНИЖЕНИЮ УВОДА:		
Уменьшить главный угол в плане		
Уменьшить осевое биение шпинделя		
Повысить точность заточки (снизить допуск) главного угла		
Уменьшить подачу		
Уменьшить вылет инструмента		

	Гл. уг	Ос. б. шп.	Ос. б. ин.	Доп. гл. угла	Подача	Вылет ин.
Стар. данные	59.0	0.050	0.200	3.00	0.12	110.0
Новые данные	50	0.05	0.1	1	0.07	110

Рис. 3. Результат моделирования

Анализ возможностей перехода сверления отверстий показывает [4, 5], что заданная точность обработки может быть достигнута. При этом добиться заданной точности обработки постараемся самыми простыми способами: изменением величины подачи и геометрии режущей части сверла – главного угла в плане. Однако это не дало нужного результата. Поэтому выбираем сверло повышенной точности с параметрами: допуск на заточку угла при вершине $\pm 1^\circ$, допуск на осевое биение вершины режущей кромки – 0,1 мм. Также снижаем подачу.

В результате отладки (рис. 4) увод получился 0,15 мм, т.е. в допуске. Далее подбираем диаметр сверла. Поскольку сверло оснащено пластижкой из твердого сплава, то выполнить нужное значение диаметра несложно. По рекомендации необходимый диаметр инструмента для получения минимального диаметра отверстия в пределах допуска равен 7,06. Увеличиваем диаметр до рекомендуемого и получаем результат моделирования (рис. 5). Все параметры точности в допуске.

В результате моделирования получили данные, обеспечивающие все требуемые параметры точности.

ИТОГОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

	Расчетные значения	Допускаемые значения
Увод оси	0.1456 мм	0.1600 мм
Отклонение от круглости	0.0270 мм	0.1100 мм
Разбивка отверстия	0.0721 мм	
Максимальный диаметр	7.072 мм	7.220 мм
Минимальный диаметр	6.942 мм	7.000 мм
Dmax инструмента= 7.000 мм		
Dmin инструмента= 6.970 мм		
Dном инструмента= 7.000 мм		

ПРОДОЛЖАТЬ ОТЛАДКУ? ☒ ДА ☐ НЕТ

УВЕЛИЧИТЬ ДИАМЕТР ИНСТРУМЕНТА? ☒ ДА ☐ НЕТ

Нужная величина увеличения 0.0580

Введите новое значение

	Старое	Новое
Dном. инструмента	7.000	7.06

Рис. 4. Результаты отладки

ИТОГОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОТЛАДКИ

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ		ЗАГОТОВКА		УСЛОВИЯ ОБРАБОТКИ	
ИНСТРУМЕНТ					
Диаметр	7.060	Диаметр отв дет	7.000	Длина обработки	100.000
Верхнее отклонение	0.000	Верхнее отклонен	0.220	Козф резания K1=	165.59
Нижнее отклонение	-0.030	Нижнее отклонен	0.000	K2=	555.47
Жесткость	1.2	Твердость матер	225	KK1=	285.41
Гл угол в плане	50.0	Допуск увода	0.1600	KK2=	287.33
Допуск угла	1.00	Допуск формы	0.1100	Подача	0.070
Уг наклона винт кан	30.0			Осевое биение	0.050
Угол перемычки	55.0			шпинделя	
Вылет инструмента	110.00				
Осевое биение реж кр	0.100				

РЕЗУЛЬТАТЫ ОТЛАДКИ

Инструмент – СВЕРЛО СПИРАЛЬНОЕ	Максимальный диаметр	7.131 мм
Материал инструмента – BK6	Минимальный диаметр	7.003 мм
Материал детали – BT15	Увод	0.1409 мм
	Отклонение от круглости	0.0261 мм
	Разбивка отверстия	0.0713 мм

ИТОГОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫВЕСТИ НА ПЕЧАТЬ? ☒ ДА ☐ НЕТ

Рис. 5. Результат моделирования

Следующим переходом выбираем зенкерование, которое необходимо для удаления возможной ступеньки в середине отверстия, возникающей из-за встречного сверления с двух сторон. Процедура проектирования этого перехода аналогична первому переходу. Ввод исходных данных для зенкерования показан на рис. 6, результаты отладки – на рис. 7. Параметры отверстия в заготовке берем из предыдущей операции сверления. На операциях обработки заготовок с предварительным отверстием учитывается наследование погрешностей предшествующего перехода и погрешности установки.

Таким образом, в спроектированном по предлага-

емой параметрической методологии технологическом процессе заданная точность обработки может быть достигнута за меньшее число переходов без применения дополнительных операций зенкерования и развертывания.

Технологический процесс с использованием параметрической методологии:

- 1) зацентровать отв. (1);
- 2) сверлить на глубину 58 мм, сверло Ø7,06 мм;
- А Переустановить
- 3) зацентровать отв. (1);
- 4) сверлить отв.(1) на проход, сверло Ø7,06 мм;
- 5) зенкеровать.

Рис. 6. Исходные данные для моделирования

Рис. 7. Результат отладки

Другим эффектом применения новой методологии параметрического проектирования является снижение времени и материальных затрат на отладку технологического процесса при ТПП. Так как основные параметры переходов (геометрия инструмента, режимы резания, параметры оснастки, оборудования

Сведения об авторах

Дерябин Игорь Петрович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Технология машиностроения, станки и инструмент» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет», г. Челябинск. Тел.: 8(3513)66-53-28. Fax: (3153) 63-44-03. E-mail: derigr@gmail.com.

Чабуркина Анна Сергеевна – аспирант кафедры «Технология машиностроения, станки и инструмент» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет», г. Челябинск. E-mail: Chas1@bk.ru.

и др.) определены расчетными методами для обеспечения заданной точности обработки, этап натурной отладки может быть значительно упрощен. Выявленные на этом этапе недостатки технологического процесса могут быть устранены при помощи компьютерной диагностики.

Предлагаемая методика параметрического проектирования технологических процессов позволяет усовершенствовать систему ТПП, в которой этап параметрического проектирования планов обработки одновременно решает и задачи отладки, возникающие на этапе внедрения спроектированного технологического процесса в производство, что значительно сокращает затраты времени и материальных средств на этом этапе.

Список литературы

1. Дерябин И.П. Методология параметрического проектирования технологических процессов // Инженерный журнал. 2012. №6. С. 3-6.
2. Дерябин И.П., Гузев В.И. Прогнозирование параметров точности при обработке отверстий // Технология машиностроения. 2006. №4 (46). С. 9-14.
3. Дерябин И.П. Проектирование, отладка и диагностика технологических процессов в АСТПП // Вестник машиностроения. 2008. №1. С. 43-45.
4. Дерябин И.П. Информационно-справочная база погрешностей обработки отверстий для технологического проектирования // Инженерный журнал. 2008. №9. С. 16-21.
5. Гузев В.И., Батуев В.А., Сурков И.В. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с ЧПУ: справочник. М.: Машиностроение, 2005. 386 с.

APPLICATION OF ENGINEERING PROCESS DESIGN PARAMETRIC METHODOLOGY FOR DEEP HOLES MACHINING

Derjabin Igor Petrovitch – D.Sc. (Eng.), professor, Technology of Mechanical Engineering, Machinery and Tools department, South Ural State University, Chelyabinsk. Phone: 8(3513) 66-53-28. Fax: (3153) 63-44-03. E-mail: derigp@gmail.com.

Chaburkina Anna Sergeevna – a postgraduate student, Technology of Mechanical Engineering, Machinery and Tools department, South Ural State University, Chelyabinsk. E-mail: Chas1@bk.ru

Abstract. When processing exact and deep openings a problem of opening axis withdrawal is emerged. An example of application of new methodology of engineering processes parametrical design for deep openings processing is given in the article. The way you can achieve a given accuracy in fewer clicks on the basis of computer-based debugging greatly reducing the complexity of manufacturing is shown.

Keywords: processing of deep openings, parametrical design, accuracy of processing, computer debugging.

References

1. Derjabin I.P. Metodologiya parametricheskogo proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov [Methodolog of parametrical design of technological processes]. *Engineering magazine*, 2012, no. 6, pp. 3-6.
2. Derjabin I.P., Guzeev V.I. Prognozirovaniye parametrov tochnosti pri obrabotke otverstij [Forecasting of accuracy parameters when processing openings]. *Technology of mechanical engineering*. 2006, no. 4 (46), pp. 9-14.
3. Derjabin I.P. Proektirovaniye, otladka i diagnostika tekhnologicheskikh protsessov v ASTPP [Design, debugging and diagnostics of technological processes in ACTPP]. *Messenger of mechanical engineering*, 2008, no. 1, pp. 43-45.
4. Derjabin I.P. Informatsionno-spravochnaya baza pogreshnostej obrabotki otverstij dlya tekhnologicheskogo proektirovaniya [Directory base of errors of processing of openings for technological design]. *Engineering magazine*, 2008, no. 9, pp. 16-21.
5. Guzeev V.I., Batuyev V.A., Surkov I.V. Rezhimy rezaniya dlya tokamykh i sverlil'no-frezerno-rastochnykh stankov s CHPU [Rezhimy of cutting for turning and drilling and milling and boring machines with ChPU]. Moscow: Mechanical engineering, 2005, 386 p.

УДК 621.771

Белевский Л.С., Исмагилов Р.Р.

ОПЫТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ СТАЛЬНЫХ РАБОЧИХ ВАЛКОВ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ИЗ СЛИТКОВ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА

Аннотация. Разработана технология изготовления литых стальных валков станов холодной прокатки из слитков электрошлакового переплава. Изучены свойства литокованных валков из стали марки 9Х2МФ-Ш и литых валков из стали марки 60ХЗСМФ-Ш. Установлено, что стоимость изготовления литого валка на 17% ниже, чем литокованного.

Ключевые слова: рабочие валки, холодная прокатка, электрошлаковый переплав, механические свойства.

Рабочие валки листовых станов холодной прокатки, изготавливаемые по традиционной технологии, имеют глубину закаленного слоя всего 10-15 мм. В результате стойкость их низкая, и до 40% валков выходит из строя преждевременно по поверхностным повреждениям – трещины, выкрошки, отслоения. Примерно такое же количество валков списывается по причине навар рабочей поверхности бочки. Большая глубина закаленного слоя может быть достигнута путем использования новых материалов и совершенствования технологии изготовления валков. Одним из путей борьбы с наваром валков при обрывах является использование валковых материалов, обладающих противонаварными свойствами, например сталей с повышенным содержанием кремния или чугуновых валков [1, 2].

Анализ технических характеристик валков холодной прокатки ведущих зарубежных фирм [3, 4] позволяет сделать вывод, что для увеличения глубины закаленного слоя следует повысить степень легирования стали, в основном хромом. Повышение прокаливаемости возможно также при применении заготовки электрошлакового переплава (ЭШП), обеспечивающего значительное снижение загрязненности стали неметаллическими включениями, особенно в поверх-

ностных слоях, подвергающихся закалке.

При разработке технологии изготовления валков холодной прокатки (ВХП) в условиях предприятий ООО «ЮжУралТехноТрейд», г. Магнитогорск, и ООО «Уральский завод нестандартного оборудования» («УЗНО»), г. Орск, использованы заготовки ЭШП и повышение степени легирования хромом. Выбор в качестве заготовки для изготовления рабочих ВХП металла ЭШП объясняется значительными его преимуществами перед металлом электродуговой выплавки [5]. При ЭШП количество неметаллических включений, особенно сульфидов, уменьшается в 1,5-2,5 раза. Достигаются также меньшая микронеровность, повышенная плотность и равномерность структуры и, следовательно, одинаковость свойств металла по сечению и высоте переплавленного слитка. Сталь ЭШП характеризуется меньшей дендритной неоднородностью, более равномерным распределением ликвирующих элементов, большим на 25% пределом усталости.

Валки с литой бочкой и коваными шейками классифицируются как «литокованные». При изготовлении валков в литокованном исполнении, в качестве электродов для ЭШП использовались отработанные валки.

В этом случае исключаются такие технологические операции, как выплавка стали и разливка в слитки, штамповка слитков под электроды. Технологический процесс состоит из ЭШП отработанных валков под слиток с диаметром бочки, имеющим припуск на механическую обработку, ковку шеек со свободным уковом, механической и термической обработки. Валки из слитков ЭШП изготавливали также полностью в литом исполнении [6]. Технологический процесс состоит из ЭШП отработанных валков в слитки круглого сечения под размер бочки с припуском на механическую и термическую обработку. Размеры слитков ЭШП имеют диаметр 530 мм, массу до 8000 кг, содержание хрома до 3,5%. Изготовление валков в литом исполнении выявило ряд преимуществ перед исполнением в литокованом исполнении:

- исключен дорогостоящий и трудоемкий процессковки шеек, в результате чего уменьшается вероятность возникновения брака кованого происхождения;
- промышленные испытания показали, что шейки литых валков менее подвержены повреждениям при аварийном разрушении подшипников, т.к. литая сталь со столбчатой структурой, ориентированной в направлении максимальных напряжений, возникающих при термических ударах, имеет повышенную термостойкость, износостойкость, а также более высокую прочность и пластичность в нагретом состоянии;
- снижена себестоимость изготовления валков, несмотря на повышенные затраты на проведение механической обработки.

В табл. 1 представлены усредненные данные стоимости одной тонны изготовления валков разных сортов по переделам по схемам литокованого и литого исполнения из слитков ЭШП. Анализ представленных в табл. 1 данных показывает, что ковка шеек составляет 33,4% от общих трудозатрат изготовления литокованого валка. Устранением этого трудоемкого и энергоемкого технологического процесса достигается снижение общей себестоимости изготовления литого валка на 17% по сравнению с литокованым исполнением.

Были проведены металлографические исследования валков из металла ЭШП с целью выявления соответствия свойств валков требованиям нормативных документов.

Изучение свойств литокованных валков из стали марки 9Х2МФ-Ш. Металлографическое исследование проводилось на темплетах, вырезанных из литой бочки и кованой шейки (уков 2,7) из валка №1356, изготовленного из слитка ЭШП и прошедшего первичную термическую обработку из двух нормализаций и отпуска и подготовленного к закалке бочки. Химический состав валка №1356 из стали 9Х2МФ-Ш:

C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	V	Ni	Cu
0,86	0,35	0,31	0,006	0,016	1,79	0,24	0,13	0,18	0,18

Макроструктура изучалась на пробах от верхнего и нижнего краев бочки и с обеих шеек. Серные отпечатки по Бауману на всех пробах выявили мелкие, частично мелкие включения, расположенные скоплениями. Рыхлость и пористость отсутствуют. Глубоким травлением выявлена точечная неоднородность, балл – 1,5 шкала 2 по ГОСТ 10243. Серный отпечаток по Бауману не превышает 1-го балла.

Таблица 1

Усредненные данные себестоимости изготовления по переделам одной тонны готового валка по разным схемам исполнения

Технологическое исполнение	Себестоимость переделов, руб./тн					Общая стоимость	
	Изготовление слитка ЭШП	Ковка шеек	Черновая мех. обработка	Термическая обработка	Чистовая мех. обработка	Руб./тн	%
Литокованный	61000	49600	5275	27000	5400	148495	100
Литой	69000	-	21600	27000	5400	123000	83

Макроструктура кованых шеек и литой бочки плотная, без дефектов, практически не отличается друг от друга. Шлаковые включения, трещины, флокены, газовые пузыри, усадочные рыхлоты во всех темплетах отсутствуют (рис. 1, 2).

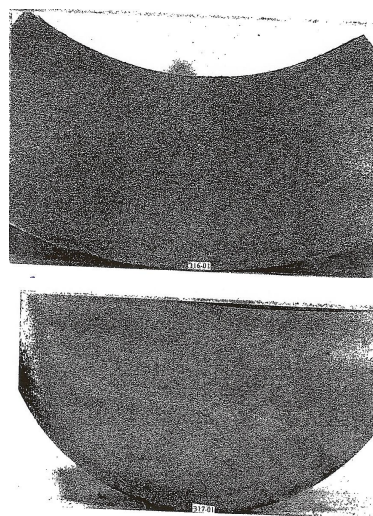


Рис. 1. Макроструктура бочки валка Рис. 2. Макроструктура шейки валка

Испытания на разрыв и ударную вязкость проводили на образцах, отобранных в тангенциальном направлении. Усредненные результаты испытаний сведены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства проб (валок из стали 9Х2МФ-Ш)

Место отбора проб	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	Ψ , %	KVC ⁺²⁰ , Дж/см ²
Бочка	363,3	736,6	19,5	38,3	25,9
Шейка	383,8	810,0	19,0	38	25,8

На основании приведенных данных можно заключить, что механические свойства стали ЭШП соответствуют стандартным справочным данным для нормализованной стали 9Х2МФ. Структура и механические свойства металла бочек и кованных шеек практически не отличаются.

Изучение свойств литых валков из стали марки 60Х3СМФ-Ш

Сталь марки 60Х3СМФ-Ш с повышенным содержанием хрома до 2,5-3,5%. Хром, содержащийся в феррите и карбидах, увеличивает дисперсность структуры. В некоторых случаях хром повышает твердость и прочность мартенсита. Наиболее эффективное воздействие на прочность оказывает не хром, растворенный в феррите или содержащийся в карбидах, а хром, который при закалке переводится в мартенсит.

Темплет для исследования отобран от заготовки валка размером 500×1200 после первой механической и предварительной термической обработки в районе технологической пробы от прибыльной части шейки с диаметром 300 мм. Химический состав металла валка №1458 следующий:

C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	V
0,72	0,8	0,65	0,007	0,017	3,18	0,13	0,10

Исследования серного отпечатка по Бауману, макроструктуры, твердости и загрязненности по неметаллическим включениям показали полную идентичность с параметрами стали марки 60Х2СМФ-Ш. Микроструктура после двойной нормализации и отпуска в темпете из стали 60Х3СМФ-Ш состоит из сорбита и карбидов.

Механические свойства в тангенциальном направлении, вырезанные в 1/3 от поверхности темплета от валка из стали 60Х3СМФ-Ш, следующие:

σ_t , МПа	σ_b , МПа	$\delta_{5\%}$	φ , %	KCU, Дж/см ²
640	980	20	28	34

Сведения об авторах

Белевский Леонид Сергеевич – д-р техн. наук, проф. кафедры прикладной механики и графики ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.: 8 (3519) 29-84-38. E-mail: l.belevskiy@mail.ru.

Исмагилов Рамиль Равкатович – аспирант кафедры прикладной механики и графики ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», ведущий специалист по валкам и подшипникам отдела оборудования ОАО «ММК». Тел.: 8 (3519) 24-75-20. E-mail: valki@mmk.ru.

При сравнении механических свойств темплетов из стали марок 60Х3СМФ-Ш и 60Х2СМФ-Ш выявлено некоторое повышение пластических свойств у стали 60Х3СМФ-Ш. Это обеспечивается увеличением количества дисперсной структуры, легированной хромом (2,5-3,5%) углеродистой стали. Металлографическое исследование темплетов литых валков из стали 60Х3СМФШ позволяет сделать следующие выводы:

- макро- и микроструктура соответствуют требованиям нормативных документов;
- легирование стали хромом в пределах 2,5-3,5% повышает пластические свойства.

Заключение

Разработанный способ изготовления валков из слитков ЭШП с использованием в качестве электрода отработанного валка полностью в литом исполнении имеет ряд существенных преимуществ перед исполнением валков в литокованном исполнении. Установлено, что устранение технологического процессаковки шеек позволяет снизить себестоимость изготовления литого валка на 17% по сравнению с литокованным исполнением.

Список литературы

1. Белевский Л.С., Исмагилов Р.Р. Пути повышения служебных свойств валков станов холодной прокатки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. №1. С. 56-60.
2. Испытания чугуновых валков на листовом стане холодной прокатки / Р.Р. Исмагилов, И.В. Боровков, Л.С. Белевский, А.Ю. Фиркович // Черные металлы. Спец. выпуск. 2011, июнь. С. 75-77.
3. Прокатные валки: монография / К.Н. Вдовин, Р.Х. Гималетдинов, В.М. Колокольцев и др. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2005. 543 с.
4. Материалы и технология изготовления валков станов горячей и холодной прокатки. Справ. пособие. / А.Ю. Фиркович, О.С. Клочков, Р.Р. Исмагилов и др. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2012. 248 с.
5. Башнин Ю.А. Влияние способа выплавки на структуру и свойства стали для производства валков холодной прокатки // Сталь. 1984. №10. С. 65-69.
6. Клочков О.С. и др. Производство стальных прокатных валков на ООО «ЮжУралТехноТрейд» // Труды VIII конгресса прокатчиков, Магнитогорск, 11-15 октября 2010 г. Магнитогорск, 2010. Т. II. С. 465-468.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

EXPERIENCE OF MANUFACTURE OF CAST STEEL WORKING ROLLS OF COLD ROLLING MILL FROM ELECTROSLAG REMELTING INGOTS

Belevskiy Leonid Sergeevich – D.Sc. (Eng.), professor, Applied Mechanics department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Phone: 8 (3519) 29-84-38. E-mail: l.belevskiy@mail.ru.

Ismagilov Ramil Rafkatovich – a postgraduate student, Applied Mechanics department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, a leading expert on rollers and bearings of Equipment Division, Magnitogorsk Iron and Steel Works OJSC. Phone: 8 (3519) 24-75-20. E-mail: valki@mmk.ru.

Abstract. The technology of manufacture of cast steel work rolls of cold rolling mill from ingot by electroslag remelting has been developed. The properties of cast forging rolls from steel 9Cr2MV-S and cast rolls from steel 60Cr3SiMV-S have been studied. It was determined that the cost of cast roll manufacture at 17% lower, than cost of cast forging roll.

Keywords: work rolls, cold mill, electroslag remelting, mechanical properties.

References

1. Belevskiy L.S., Ismagilov R.R. Puti povysheniya sluzhebnykh svoystv valkov stanov kholodnoy prokatki [The ways of increasing of servis characteristics of rolls on cold mills]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012, no 1, pp. 56-60.
2. Ismagilov R.R., Borovkov I.V., Belevskiy L.S., Firkovich A.Yu. and oth.

Isipyaniya chugunnykh valkov na listovom stane kholodnoy prokatki [The test of iron rolls on sheet cold mill]. *Stahle und Eisen. Special issue*. June 2011, pp. 75-77.

3. Vdovin K.N., Gimaletdinov R., Kolokoltsev V.M. and oth. *Prokatnye valki* [Rolls]. Magnitogorsk, 2005, 543 p.
4. Firkovich A.Yu., Klochkov O.S., Ismagilov R.R. and oth. *Materialy i tekhnologiya izgotovleniya valkov stanov goryachej i kholodnoy prokatki. Sprav. posobie* [The materials and technology of. Reference textbook]. Magnitogorsk, 2012. 248 p.
5. Bashnin Yu.A. Vliyanie sposoba vyplavki na strukturu i svoystva stali dlya proizvodstva valkov kholodnoy prokatki [The influence of the means of smelting on structure and properties of steel for manufacture of rolls cold mills]. *Steel*, 1984, no10, pp. 65-69.
6. Klochkov O.S. and oth. Proizvodstvo stal'nykh prokatnykh valkov na OOO «YUzhUralTehnTrejd» [The manufacture of steel rolls on OOO «JgUral Techno Trade»]. *Transactions VIII Congress of rollers*, Magnitogorsk, 11-15 October, 2010. Magnitogorsk, 2010, vol. 11, pp. 465-468.

УДК 621.78:672.71

Павлова Н.Г., Никитин С.В., Емелюшин А.Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРЕСС-НОЖНИЦ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ МЕТАЛЛОЛОМА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Аннотация. На сегодняшний день важная роль в производстве и переработке металлопроката отводится ножам для резки металла. В настоящей статье рассмотрена проблема увеличения стойкости сменного оборудования и найдено решение на одном из первых этапов производства металлопроката – подготовка металлолома.

Проведен анализ условий работы ножей для рубки металла, рассмотрены причины преждевременного выхода из строя и способы повышения их стойкости. Приведены обоснования для разработки новой стали, разработан новый химический состав стали для изготовления ножей. Проведены испытания механических характеристик экспериментальных сплавов. Выявлен оптимальный режим термической обработки металла для достижения минимальной степени износа режущей кромки ножа. Выявлен сплав с наиболее оптимальными свойствами, обладающий высоким уровнем ударной вязкости при сохранении высокой твердости и стойкости.

После внедрения ножей, изготовленных из стали с новым химическим составом, проведен анализ их работы. Полученные результаты увеличения стойкости на 40-50% при увеличении себестоимости на 4% позволяют удерживать существующие рынки сбыта с перспективой выхода на внешний рынок.

Ключевые слова: переработка металлолома, марки стали, стойкость ножей, оптимальный химический состав металла, экспериментальные сплавы.

С целью подготовки металлолома для его дальнейшей переработки в копровых цехах его рубят на мерные длины. В условиях потребности постоянного наращивания производительности приобретает более мощное оборудование и возникает проблема повышения стойкости сменного инструмента для резки лома.

Стойкость сменного инструмента пресс-ножниц (ножей) оценивается по количеству переработанного лома, приходящегося на одну смену режущей кромки ножей. Одна кромка ножа (пресс-ножницы с усилием реза 10 МН) рассчитана в среднем на 1500-2000 т лома [1, 2].

При анализе работы пресс-ножниц «Colmar» выявлено, что производительность зачастую занижена из-за преждевременного выхода ножей из строя. В связи с этим возникает необходимость повышения стойкости ножей для увеличения производительности агрегата резки.

На пресс-ножницах «Colmar» рубят металл различной твердости, толщины и химического состава, как тонкий листовой прокат из стали 3, так и упрочненные рельсы из стали 65Г. Ножи работают в условиях как положительных, так и отрицательных температур.

В качестве сменного инструмента использовались ножи, изготовленные из стали марки 6ХВ2С. Изучая статистические данные по эксплуатации ножей из этой марки стали, выявлено, что ножи имеют наиболее долгий срок службы при уровне твердости 46-48 HRC. При меньшем уровне твердости ножи выходят из строя из-за чрезмерно быстрого износа рабочей кромки, при большем – из-за сколов по рабочей кромке. Однако при эксплуатации ножей с твердостью 46-48 HRC также происходят сколы по рабочей кромке, что обусловлено недостаточным уровнем пластических характеристик и, в частности, ударной вязкости основы металла. После установки пресс-ножниц «Colmar» с большей мощностью стойкость ножей из стали марки 6ХВ2С снизилась.

Так как ножи работают в условиях высоких ударных нагрузок, ножевая сталь должна обладать высоким уровнем ударной вязкости в сочетании с высокой твердостью для режущих свойств ножей.

Содержание углерода в стали должно быть достаточным для обеспечения закаливаемости на высокую твердость (55-60 HRC). Однако при содержании углерода более 0,6% наблюдается заметное снижение

уровня вязкости. Из легирующих элементов, растворенных в мартенсите, увеличивают ударную вязкость: хром, при увеличении его концентрации до 3%, и никель. Однако известно, что в высоколегированных сталях (с высоким содержанием хрома или вольфрама) добавки никеля не увеличивают, а наоборот, снижают ударную вязкость [3, 4]. Необходимо подобрать содержание каждого легирующего элемента таким образом, чтобы легирование никелем не приводило к уменьшению ударной вязкости. Кроме того, никелевый мартенсит, из-за его небольшой способности к упрочнению, в большей степени восприимчив к пластической деформации, т.е. возможно увеличение степени износа режущей кромки ножа.

Для повышения ударной вязкости при сохранении высокой твердости необходимо получение мелкозернистой структуры путем подбора оптимальных режимов термической обработки и легирующих элементов. Наиболее сильно сдерживающее влияние на увеличение величины зерна при нагреве оказывает ванадий и молибден. Молибден в твердом растворе наряду с увеличением ударной вязкости увеличивает прочностные характеристики.

Для выявления оптимального химического состава изучали влияние режимов термической обработки и содержания легирующих элементов на механические свойства сталей, аналогичных (Д132) ГОСТ 5950-2000. Путем поочередного изменения содержания основных легирующих элементов (C, Cr, Ni) в стали необходимо подобрать химический состав, который сочетает в себе максимальный уровень ударной вязкости при высокой твердости.

Выплавлено три сплава с различным содержанием углерода: сплав №1 – 0,51%; сплав №2 – 0,62% и сплав №3 – 0,55%. Среднее содержание остальных легирующих элементов в каждом сплаве: Cr=1,2; Mo=0,7; V=0,4; Si=0,3; Mn=0,6; Ni=0,8.

Экспериментальные сплавы для изучения структуры и свойств выплавляли в индукционной печи ИСТ-006 с основной футеровкой. Выпуск металла производился при температуре не ниже 1600°C и отключенной печи. Выпуск металла производился в подогретые до 700-800°C ковши. Заливка стали осуществлялась в сухие, песчано-глинистые формы.

После выплавки опытных сталей литые заготовки перековывались в поковки образцов на ударную вязкость и закаливались. Для исправления ковочной структуры и улучшения обрабатываемости кованые заготовки подвергались нормализации с 900°C с последующим отпуском на 680°C.

Выбор оптимальных температур нагрева под закалку и отпуска проводился на основании результатов исследования микроструктуры и твердости образцов, прошедших термическую обработку, – объемная закалка с отпуском. Опробовано три температуры нагрева под закалку: 900, 940 и 980°C и температуры отпуска: 280, 350, 400, 450, 550°C.

Измерения твердости термообработанных образцов показали зависимость снижения уровня твердости с повышением температуры отпуска аналогично стали марки 5Х2МНФ по ГОСТ 5950-2000 (рис. 1).

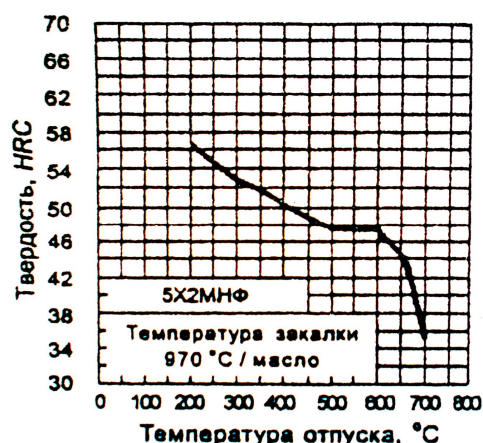


Рис. 1. Зависимости твердости от температуры отпуска для стали марки 5Х2МНФ по ГОСТ 5950-2000

Испытания на ударную вязкость показали следующие результаты (рис. 2, 3).

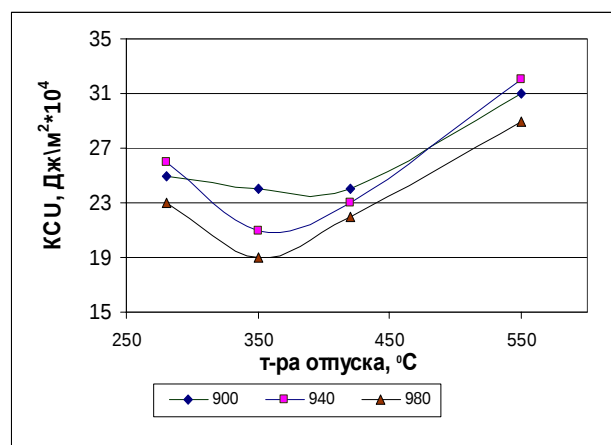


Рис. 2. Зависимость ударной вязкости от температуры отпуска для сплава с содержанием углерода 0,62

По результатам механических испытаний сплавов с различным содержанием углерода выявлено, что максимальный уровень ударной вязкости достигается при содержании углерода 0,51% (см. рис. 3). При содержании углерода более 0,6% наблюдается резкое падение уровня ударной вязкости. При содержании углерода менее 0,5% высокий уровень твердости в сечении ножа, необходимый для режущих свойств, не достигается. Таким образом, выбрано содержание углерода для новой марки стали в пределах 0,5-0,6%.

По результатам исследования механических свойств сплавов 1,2,3 выяснено, что оптимальным режимом термической обработки является закалка с температуры 940°C и отпуск с температуры 280°C. При закалке с температуры 940°C достигается более оптимальное легирование твердого раствора при сохранении достаточно мелкой величины мартенситной иглы (2-4 балл). Температура отпуска 280°C обеспечивает наименьшее выделение дисперсных карбидов из твердого раствора и, тем самым, наименьшее падение ударной вязкости.

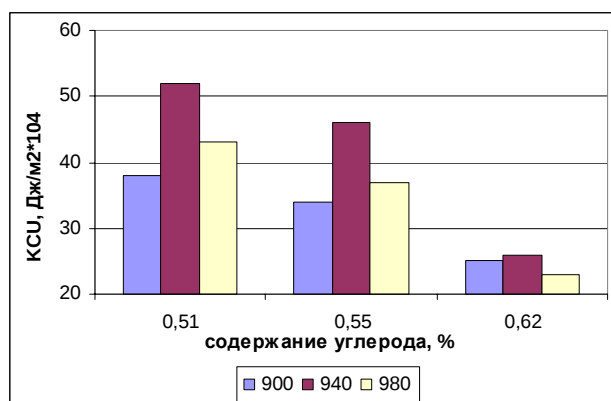


Рис. 3. Зависимости ударной вязкости от содержания углерода

При подборе легирующих элементов решено выплавить сплавы с различным содержанием элементов Cr и Ni, а элементы C, Mo, V, Si и Mn принять как постоянную величину, но в достаточном количестве для обеспечения высокой прокаливаемости, сохранения мелкозернистости и теплоустойчивости.

Таким образом, выплавлено три сплава с различным содержанием хрома и никеля:

- сплав №4 Cr=1,64; Ni=1,32;
- сплав №5 Cr=1,26; Ni=1,88;
- сплав №6 Cr=1,22; Ni=3,26.

В табл. 1 представлены полученные свойства после закалки с 940°C и отпуска при 280°C.

Таблица 1

Номер сплава	Твердость, HRC	Микротвердость металлической основы, МПа	Ударная вязкость, Дж/см²	Количество остаточного аустенита, %
4	58	5444	44	1,83
5	60	6140	49	1,89
6	60	4688	51	7,31

Из представленных в табл. 1 механических свойств видно, что минимальный уровень ударной вязкости имеет сплав №4. Данный показатель получен в основном по причине наименьшего содержания в нем никеля.

Максимальный уровень ударной вязкости имеет сплав №6, однако этот сплав имеет также максимальный уровень остаточного аустенита и минимальную микротвердость металлической основы. Повышенный уровень остаточного аустенита в никелевом мартенсите, из-за его небольшой способности к упрочнению, в большей степени восприимчив к пластической деформации [1], т.е. возможно увеличение степени износа режущей кромки ножа.

Таким образом, после проведения испытаний образцов из сплавов 4,5,6, выявлено, что наиболее оптимальными свойствами обладает сплав №5, он обладает высоким уровнем ударной вязкости при сохранении высокой твердости, микротвердости металлической основы и небольшом содержании

остаточного аустенита (рис. 4).

Для выбора оптимального способа изготовления ножей опробовали два варианта получения заготовки: 1 поковка из слитка; 2 поковка из слитка, полученного переплавом ЭШП литой заготовки из электропечи ДСП 17.12.05.

При ЭШП за счет изменения условий охлаждения (в кристаллизаторе) уменьшаются пористость и рыхлость. Поэтому улучшаются:

- а) пластичность, особенно в поперечном направлении у сталей повышенной вязкости (при 40-50 HRC);
- б) прочность и вязкость на 5-10% в состоянии высокой твердости (60-67 HRC).

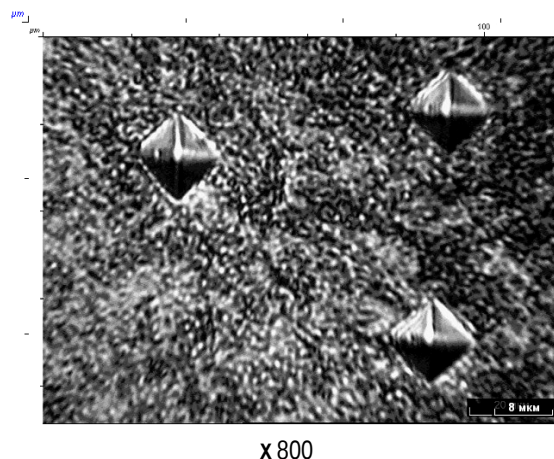


Рис.4. Фотография микроструктуры с замером микротвердости (сплав №5)

При изготовлении опытных партий ножей были сделаны пробы для исследований размерами 100×100×100 мм, соизмеримые с размерами ножей. Пробы прошли термическую обработку по выбранному режимам.

По результатам исследования распределения твердости по сечению проб выявлено, что они прокаливаются на 100 мм.

Максимальный уровень твердости (56 HRC) достигается при закалке с температуры 940°C.

Для исследования микроструктуры были вырезаны образцы из проб и проведены металлографические исследования. При закалке с температуры 940°C сохраняется достаточно мелкая величина иглы мартенсита (3 балла).

Для сравнения уровня ударной вязкости стали марки 6XB2C и специальной стали опытной партии были изготовлены образцы на удар и проведены испытания в зависимости от температуры отпуска.

Результаты испытаний приведены в табл. 2

Таблица 2

Температура отпуска, °C	Спец. сталь		Спец. сталь с ЭШП		6XB2C	
	KCU, Дж/см²	Твердость, HRC	KCU, Дж/см²	Твердость, HRC	KCU, Дж/см²	Твердость, HRC
450	30	51	35	51	18	50
550	40	45	44	45	25	40
650	55	33	58	33	39	30

Зависимость ударной вязкости от температуры отпуска приведена на рис. 5.

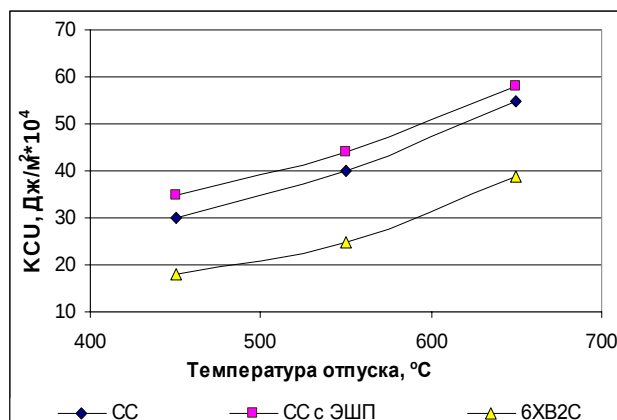


Рис. 5. Зависимость ударной вязкости от температуры отпуска: СС – заготовка, полученная из кузнечного слитка; СС с ЭШП – заготовка, полученная из слитка ЭШП

Таким образом, для изготовления ножей для рубки металла выбрана комплексно легированная сталь 55ХН2МФ, близкая по химическому составу стали марки 5Х2МНФ по ГОСТ 5950-2000. Новый химический состав стали обеспечивает превосходство, по сравнению с известными, в ударной вязкости, прокаливаемости и твердости, что в свою очередь предполагает увеличение стойкости.

В ЗАО «Профит» г. Магнитогорск в 2005 г. была внедрена в производство опытная партия ножей холодной рубки пресс-ножниц «Colmag», изготовленных из специальной стали. Стойкость ножей увеличилась в среднем на 40-50%.

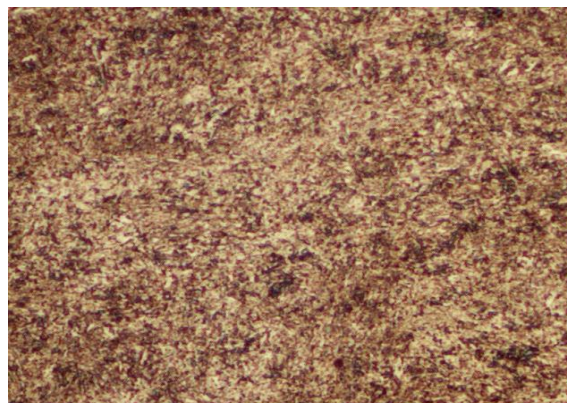
По сравнению с ножами из стали 6ХВ2С, которые в большинстве случаев выходят из строя из-за сколов

по рабочей кромке, на ножах из специальной стали не было зафиксировано ни одного случая скола.

Выводы

1. Ударная вязкость разработанной стали выше на 30-40%, чем у стали марки 6ХВ2С при одинаковом уровне твердости.

2. Стойкости ножей на 40-50% выше, чем у стали марки 6ХВ2С при увеличении себестоимости всего на 4%.



×1000

Рис.6. Закалка с температуры 940°C (сплав №5)

Список литературы

1. Заварыкин Е.С. Эксплуатация ломоперерабатывающего оборудования // Рынок вторичных металлов (РВМ). 2004. №2. С. 20-22.
2. Еремин А.И. Пресс-ножницы: как сделать правильный выбор // РВМ. 2004. №1. С. 8-41.
3. Емельюшин А.Н., Павлова Н.Г., Никитин С.В. Разработка и освоение новой универсальной марки стали для ножей ОАО «ММК» // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2009: сб. статей междунар. науч.-техн. конф. Волжский, 2010. С. 56-59.
4. Пат. 2409695 РФ. Нож для резки металла. / Емельюшин А.Н., Никитин С.В., Кадошников В.И., Молочкова О.С., Валишина Т.С., Коток А.П., Бердников С.Н. (РФ).

Сведения об авторах

Павлова Наталья Григорьевна – начальник Лаборатории термической и кузнечно-прессовой обработки ЗАО «МРК» ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Никитин Сергей Витальевич – ведущий инженер Лаборатории термической и кузнечно-прессовой обработки ЗАО «МРК» ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». E-mail: termist-met@mail.ru.

Емельюшин Алексей Николаевич – д-р техн. наук., проф., зав. кафедрой материаловедения и термической обработки металлов, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: emelushin@magtu.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

RESEARCH OF CONDITIONS OF PRESS SCISSORS OPERATION FOR SCRAP METAL PROCESSING TO INCREASE THEIR PRODUCTIVITY

Pavlova Natalia Grigorevna – Chief of Thermal and Forge and Press Processing Laboratory, «MRC» CJSC, Magnitogorsk Iron and Steel Works OJSC.

Nikitin Sergey Vitalevich – leading engineer of Thermal and Forge and Press Processing Laboratory, «MRC» CJSC, Magnitogorsk Iron and Steel Works OJSC. E-mail: termist-met@mail.ru.

Emelushin Alexey Nikolaevich – D.Sc. (Eng.), professor, Head of Material Science and Thermal Treatment of Metals department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. E-mail: emelushin@magtu.ru.

Abstract. Up to date the important role in manufacture and metal rolling processing is taken to knives for metal cutting. In the article the problem of increase in firmness of the replaceable equipment is considered and the decision on one of the first production phases of metal rolling – scrap metal preparation has been found.

Working conditions of knives for metal chipping have been analyzed, the reasons of premature failure and ways of increase of their firmness have been considered. The reasoning for the development of new kind of steel has been presented; steel new chemical composition has been developed for manufacture of knives. Experimental alloys mechanical characteristics tests have been carried out. The optimum mode of metal thermal processing to achieve minimum rate of knife cutting edge wear has been revealed. The alloy with the optimal properties and high level of impact strength in high hardness and firmness preserving is revealed.

After introduction of the knives made of steel with a new chemical composition their work has been analyzed. The results obtained of 40-50% firmness increasing at 4% cost supplement allow to keep existing markets with the prospect of entering the

foreign markets.

Keywords: scrap metal processing, steel grades, firmness of knives, optimal metal chemical composition, experimental alloys.

References

1. Zavarikin E.S. Jekspluatacija lomopererabatyvajushhego oborudovanija [Operation of the scrap metal processing of equipment]. *The Market of secondary metals (MSM)*. 2004, no. 2, pp. 20-22.
2. Eremin A.I. Press-nozhnitsy: kak sdelat' pravil'nyj vybor [Press scissors: how to make a correct choice]. *PBM*, 2004, no. 1. pp. 8-41.
3. Emeljushin A.N., Pavlova N.G., Nikitin S.V. Razrabotka i osvoenie novoj universal'noj marki stali dlja nozhej OAO «ММК» [Working out and development of new universal mark of steel for «ММК» OJCS knives]. *Processes of abrasive processing, abrasive tools and materials: Intern. Collection of Scient.Articls*. 2010, pp. 56-59.
4. Emeljushin A.H., Nikitin S.V., Kadoshnikov V.I., Molochkova O.S., Valishina T.S., Kotok A.P., Berdnikov S.N. Nozh dlja rezki metalla [A knife for sharp metal]. Patent RF, no. 2409695, 2011.

УДК 621.95; 622.143

Сергеев С.В., Сергеев Ю.С., Решетников Б.А., Шаламов В.Г.

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ПРОНИКАНИИ ВРАЩАЮЩИХСЯ МНОГОЛЕЗВИЙНЫХ ТЕЛ В ТВЕРДЫЕ СПЛОШНЫЕ СРЕДЫ

Аннотация. Вскрыты закономерности и выявлен главный динамический механизм формирования погрешностей продольной и поперечной формы скважин и отверстий при обработке их вращающимися концевыми мерными многолезвийными инструментами. Это позволит разработать математические модели расчета точности формообразования отверстий и скважин такими инструментами с учетом основных динамических факторов. Эти модели составят основу единой физической теории таких процессов.

Ключевые слова: вращающиеся буровые и металлорежущие инструменты, динамический механизм возникновения погрешностей обработки, поперечные и осевые автоколебания инструмента.

Достижение требуемого качества отверстий в машиностроении и скважин в горном деле является весьма сложной технической задачей. Процессы их получения, как правило, трудоемкие, так как занимают значительный объем машинного времени.

В машиностроении обработка отверстий осуществляется преимущественно сверлами, зенкерами, развертками и другими видами вращающихся концевых мерных многолезвийных инструментов (КММИ) с различным числом режущих лезвий, кулачков, брусков и других обрабатываемых элементов. При бурении же скважин используются различного вида вращающиеся многолезвийные буры, долота, шарошки, коронки, которые также относятся преимущественно к КММИ.

Разнообразие вращающихся КММИ и своеобразие физических явлений, происходящих при обработке отверстий в машиностроении таково, что до сих пор практически не удалось построить единую физическую теорию таких процессов, объясняющую всю совокупность эмпирически известных фактов и прогнозирующую новые эффекты и явления. Подобные теоретические обобщения отсутствуют и в бурении. Работоспособная же единая физическая теория должна объяснить явления, происходящие и при бурении скважин, и при формообразовании отверстий различными инструментами, поскольку эти процессы, без сомнения, родственны, о чем косвенно может свиде-

тельствовать хотя бы тот факт, что в английском и немецком языках понятия бурения и сверления не разделяются [1].

Без глубокого теоретического осмысления процессов проникания вращающихся КММИ в твердые сплошные среды невозможно:

- получить надежный прогноз точности формирования поверхностей на стадии проектирования технологических процессов;

- выработать направление совершенствования технологического оборудования;

- примирить различные эмпирические факты, поскольку на интуитивном уровне рассмотрения они противоречат друг другу, и разные исследователи дают диаметрально противоположные рекомендации по совершенствованию процессов формообразования отверстий и скважин. Уровень понимания этих процессов еще не достиг такого развития, когда новые данные не отменяют старые, а включают их на другом уровне.

Краткий анализ показывает, что некоторое единство взглядов на процессы сверления и бурения достигнуто различными исследователями лишь в вопросе о влиянии на увод и искривление осей обрабатываемых отверстий таких факторов, как неоднородность и анизотропность среды, в которой движется инструмент, и начальных погрешностей наладки технологических систем. Остальные же вопросы являются остро дискуссионными, причем различные гипотезы и раз-

рознесенные эмпирические факты находятся во взаимном противоречии. Столь же противоречивы и рекомендации по повышению различных параметров точности обработки.

Ряд исследователей, например, видят причину искривлений отверстий и скважин в искривлении сверла или буровой колонны [2,3]. Другие это резонно отвергают, поскольку искривленный стебель сверла или бура вращается вокруг оси отверстия или скважины [5,6].

Многие исследователи видят причину погрешностей обработки в поперечных колебаниях стебля КММИ, но не указывают механизм этого влияния [6]. Вообще, причина это или следствие – остается неясным.

Многие факты, отмеченные отдельными исследователями, загадочны и плохо воспроизводимы. К ним относятся случаи значительного зенитного искривления отверстий или скважин с выходом в боковую поверхность детали или на поверхность земли, азимутальное искривление скважин, гранность отверстий, их направленность по спирали, изменение числа граней и многое другое [7,8].

Следует заметить, что формообразование скважин и отверстий КММИ – это, условно говоря, одновременная обработка внутренней поверхности несколькими одноэлементными инструментами, находящимися в координатной связи. Все эти одновременные взаимодействия находятся в сложной взаимной связи, причем нелинейной по своей сути. Поэтому принцип суперпозиции здесь неприемлем, а в синергетике прямо указывается [9,10], что в этом случае коллективное поведение системы может качественно отличаться от поведения отдельного элемента.

Некоторые исследователи совершенно справедливо считают, что выработанные ранее направления совершенствования инструмента, оборудования и технологии обработки отверстий сверлением и скважин бурением себя практически исчерпали [4,11], и прогресс в этих областях может быть достигнут лишь в результате вскрытия и использования новых эффектов и явлений, характеризующих динамические процессы работы сверл и буров.

Для исследования влияния динамических факторов на точность формообразования отверстий и скважин [11] полезно знать, как влияют статические факторы: так называемые геометрические диссимметрии, будь то погрешность заточки режущей части инструмента, неравномерный износ, величина износа оборудования и т.п.

Так, теоретически показано [12], что при базировании инструмента на поверхность резания и заходную кромку наблюдается искривление оси отверстия, когда при таком базировании имеются осевые биения шпинделя станка, то есть колебания с частотой, равной частоте вращения и с ограниченной амплитудой. Влияние таких статических факторов не является основным, поскольку они довольно легко могут быть устранены.

Кроме того, такой механизм влияния статических факторов на процесс формообразования отверстия или скважины в сплошном материале объясняет лишь образование увода оси КММИ в одном направлении (зенитный) [12] и совсем не объясняет образование других

погрешностей, таких как спиральность оси (азимутальный увод) отверстия (скважины), огранка, цилиндрическая и нарастающая разбивка отверстий и скважин.

Следует отметить, что иногда технологи, уменьшая и даже полностью исключая геометрическую диссимметрию КММИ [11], не могут добиться требуемой точности обработки. Это объясняется тем, что в процессе обработки возникают другие виды диссимметрий – кинематические, связанные непосредственно с процессом формообразования поверхности. Обработка поверхностей КММИ, даже с геометрически симметрично заточенными режущими лезвиями, неизбежно сопровождается поступательными поперечными квазикруговыми автоколебаниями с частотой ω и амплитудой A по поверхности резания относительно каждого его зуба [11,13]. При этом кинематические углы резания, а значит, и режущие свойства на зубьях КММИ будут различны из-за разнонаправленности скоростей вращения и перемещения центра КММИ. А это является главной причиной увеличения диаметра скважины или отверстия [14].

Действительно, в разбуриваемой скважине 1 (рис. 1) центр вращающегося инструмента 2 описывает квазикруговую траекторию 3.

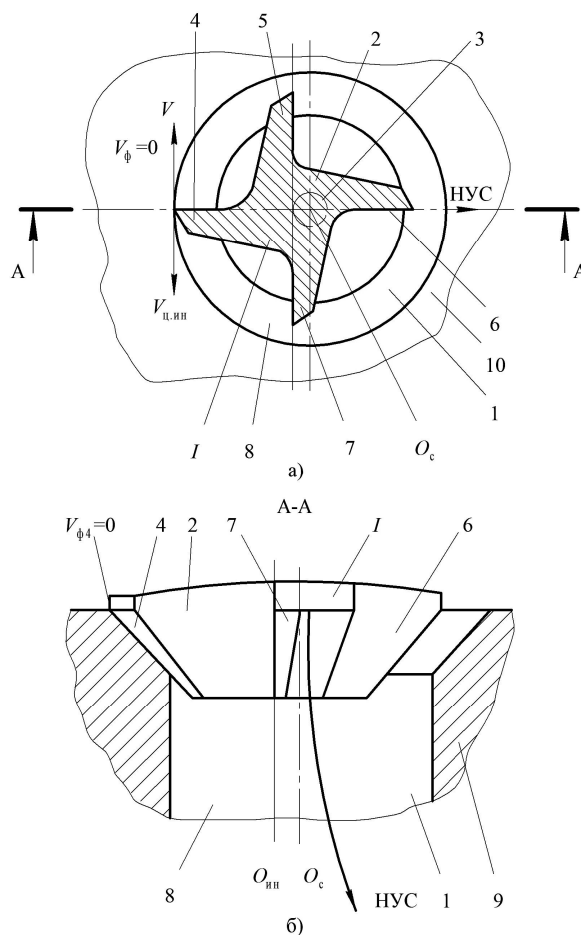


Рис. 1. Схема работы 4-хлезвийного инструмента при разбуривании скважины: а – положение инструмента относительно скважины в момент сообщения ему максимальной подачи $S + \Delta S$; б – разрез по А-А

При этом в результате равенства скоростей вращения инструмента V и перемещения его центра $V_{ц.ин}$ в противоположном направлении в определенный момент времени на режущем лезвии зуба 4 лежит центр мгновенного качения инструмента. Это означает, что данный зуб 4 не режет материал, так как фактическая скорость резания V_{ϕ} на нем в этот момент равна нулю, а остальные зубья 5-7 производят обработку, обкатываясь относительно режущей кромки зуба 4. В следующий момент времени фактическая скорость резания будет равна нулю на зубе 5, затем – на зубе 6 и т.д. Это приводит к возникновению поперечных автоколебаний инструмента с частотой ω , в десятки и сотни раз превышающей частоту вращения $\omega_{вр}$.

Другим важнейшим фактором [11], способствующим образованию погрешностей обработки скважин, являются осевые и крутильно-осевые колебания ω_0 режущей части КММИ. Поскольку он зачастую имеет пониженную жесткость в наладке и, вместе с тем, склонность к повышенному возбуждению вибраций, которые могут самовозбуждаться и при этом синхронизироваться и рассинхронизироваться. Поэтому амплитудно-фазочастотные характеристики могут иметь нестабильный характер.

Сами по себе осевые и крутильно-осевые автоколебания КММИ еще не нарушают симметрии его режущей части, но в сочетании с поперечными автоколебаниями могут приводить к возникновению погрешностей обработки. Для понимания физического смысла этого явления и для общности процессов формообразования отверстий и скважин рассмотрим положение КММИ в какой-либо момент обработки (рис. 2). Стандартный инструмент 2 идеально симметрично заточен и опирается на поверхность резания, при этом пусть ему сообщают принудительные осевые или осевые автоколебания с частотой ω_0 , равной или кратной частоте ω круговых поперечных автоколебаний. Причем максимальное приращение подачи ΔS инструменту 2 сообщают, когда его центральная ось $O_{ин}$ и предполагаемое направление увода оси (НУС) скважины, не пересекаясь, лежат в одной плоскости Б-Б (см. рис. 2, положение I инструмента обозначено штрихпунктирной линией), то есть необходимо и достаточно, чтобы ось инструмента, а соответственно, и зуб 4, на котором лежит центр мгновенного качения, в этот момент должны находиться в половине 8 скважины, противоположной направлению увода оси скважины.

После того, как инструмент 2, кроме подачи S , получает приращение подачи

ΔS , то есть инструменту 2 сообщают относительные осевые колебания с амплитудой ΔS , он перемещается вправо в НУС из I во II положение (см. рис. 2, тонкая сплошная линия). При этом режущая кромка зуба 6 срезает слой материала толщиной a_1 , а кромка зуба 4 (она в этот момент не режет, так как $V_{\phi} = 0$) опирается на поверхность 9 резания. Вследствие подачи $S + \Delta S$ кромка зуба 4 начинает перемещаться по поверхности 9 резания вниз. Ось инструмента $O_{ин}$ перемещается в положение $O'_{ин}$. Далее при вращении инструмента 2 вокруг своей оси $O'_{ин}$ последняя, двигаясь по траектории 3 против часовой стрелки, перемещается в противоположную половину 10 скважины и занимает положение $O''_{ин}$. Все зубья инструмента 2 при этом срезают слой материала a_2 , образуя разбивку смещенной на величину Δ_1 скважины с осью O'_c .

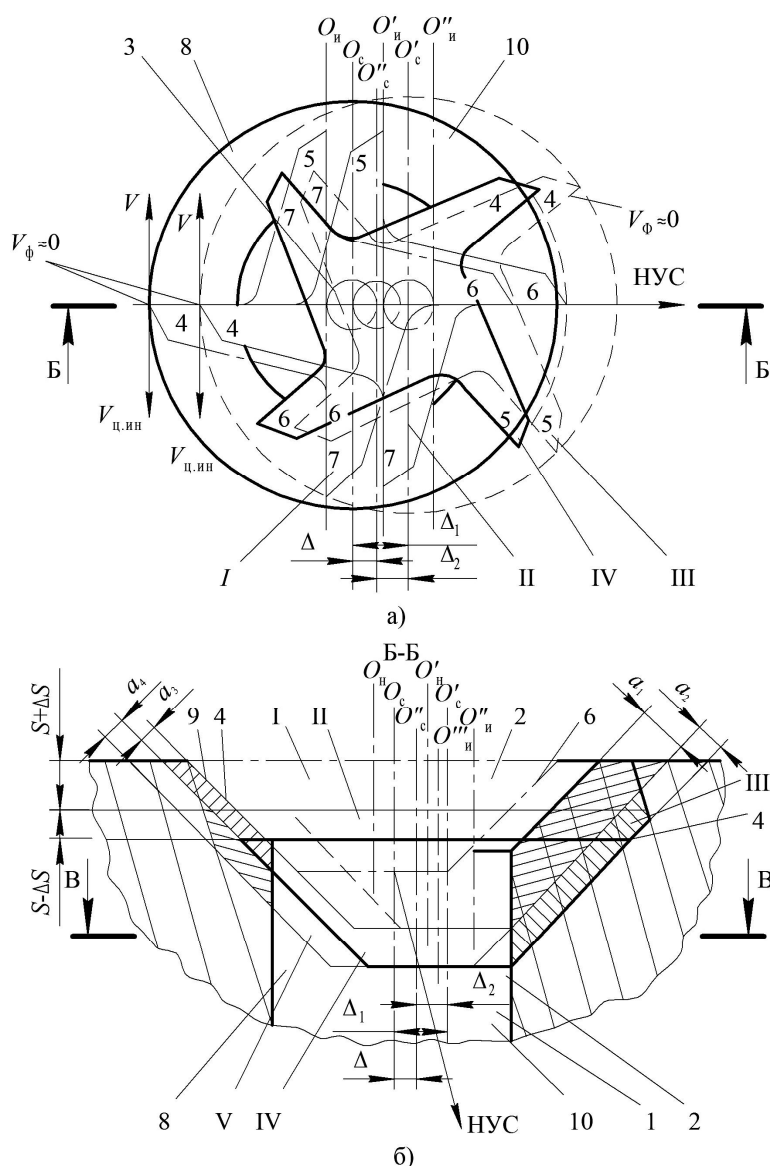


Рис. 2. Четыре характерных положения 4-зубого КММИ с симметричной заточкой лезвий при образовании увода оси скважины: а – вид сверху; б – разрез по Б-Б

Как только инструмент 2 занимает положение III (см. **рис. 2 и 3**, пунктирная линия), то есть центр инструмента, находясь уже в правой половине 10 скважины, совпадает с плоскостью Б-Б (положение $O''_и$), а на одном из зубьев, находящихся в той же половине скважины, например на зубе 4 $V_\phi \approx 0$, инструменту сообщают минимальную величину подачи. Инструмент 2 имеет подачу $S - \Delta S$, следовательно, срезает слой материала t_3 меньше слоя t_1 . В результате конус инструмента 2 смещается в плоскости Б-Б в IV положение (см. **рис. 2 и 3**, толстая сплошная линия) ввиду того, что режущая кромка зуба 4 (в этот момент она не режет материал) перемещается по поверхности резания влево. Ось инструмента 2 занимает положение $O'''_и$.

При дальнейшем вращении инструмента 2 вокруг своей оси последняя, сделав полный оборот относительно оси скважины, возвращается по траектории 3 в левую половину 8. Зубья инструмента срезают слой $a_4 = a_2$, образуя разбивку смещенного уже теперь влево скважины на величину Δ_2 , меньшую, чем Δ_1 . То есть суммарное смещение оси скважины за один оборот центра инструмента составляет $\Delta = \Delta_1 - \Delta_2$. Это – величина увода оси за оборот центра инструмента, то есть за период одного его кругового поперечного автоколебания.

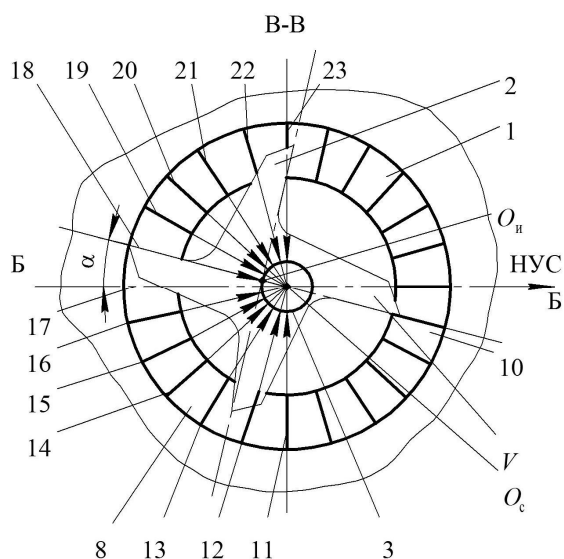


Рис. 3. Разрез по В-В на рис. 2 – схема образования суммарного смещения оси КММИ из элементарных его перемещений в скважине за полный оборот КММИ

Когда центр инструмента совершит полный оборот и вернется в первоначальное положение, то есть ось инструмента $O'''_и$ вернется в половину 8 и совместится с плоскостью Б-Б, проходящей через центр скважины и НУС, зуб 4, на режущем лезвии которого в этот момент времени лежит центр мгновенного качения инструмента, сместится по отношению к первоначальному положению I на угол α (см. **рис. 3**) и займет V положение (тонкая сплошная линия). То есть за каждое полное колебание центра инструмента зуб с фактической нулевой скоростью в данный момент времени будет смещаться на дискретный угол α .

Сообщение приращения подачи $S + \Delta S$ инструменту 2 в моменты периодического появления его центра в половине 8 и последовательного совмещения одного из его зубьев (у которого $V_\phi \approx 0$) с радиусами 11-23 сопровождается смещением оси инструмента вдоль всех этих направлений. При этом вектор суммарной равнодействующей этих элементарных перемещений совпадает с НУС и нарастает только в направлении радиуса 17 по мере углубления инструмента 2 в среду, поскольку все остальные перемещения вдоль линий действия рисок 11-16 и 18-23 взаимно компенсируются (их проекции на плоскость, перпендикулярную оси, попарно равны по величине и противоположно направлены).

Получив смещение Δ (**рис. 4**), инструмент 2 занимает положение, при котором заборный конус инструмента 2 имеет некоторый наклон к его оси, поскольку заборный конус инструмента 2 имеет значительно большую радиальную жесткость, чем его стембель. Таким образом, на следующем обороте центра $O_и$ инструмента 2 перемещение его головки проходит под углом γ к оси инструмента. Так начинает формироваться скважина с криволинейной осью. После следующего оборота угол γ увеличивается. Получается скважина с криволинейной осью.

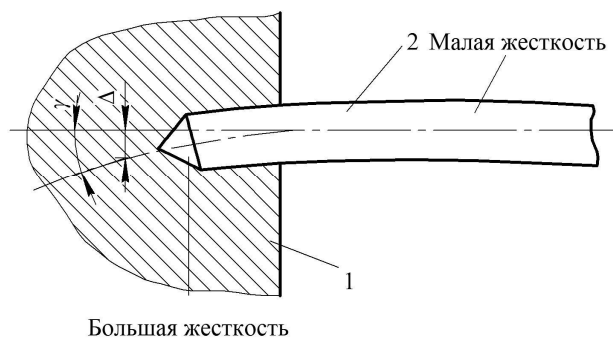


Рис. 4. Схема движения КММИ в скважине – накопление увода оси скважины

Отверстия или скважины с криволинейной осью были получены (**рис. 5**) при обработке их любым КММИ, например шнековым буром, спиральным сверлом, а также буровой коронкой, для этого инструменты соединялись со шпинделем 24 через высокочастотный вибровозбудитель 25.

НУС определяется сдвигом фаз осевых и поперечных автоколебаний, то есть при совмещении максимального приращения подачи с моментом появления центра инструмента в той половине скважины, которая противоположна направлению увода ее оси. Изменение фазы осевых колебаний относительно фазы поперечных автоколебаний осуществляли поворотом относительно оси вращения инструмента дополнительного датчика 26 положения, запускающего вибратор 25, относительно скважины (см. **рис. 5**). При этом датчик 26 устанавливали в плоскости Б-Б, проходящей через ось скважины и ее НУС. Во время бурения (сверления) датчик 26 запускает вибратор 25, сообщая инструменту 2 осевые колебания с частотой

ω_0 , равной частоте ω поперечных автоколебаний, а именно подачу $S + \Delta S$ в момент появления центра инструмента в половине 8 скважины и подачу $S - \Delta S$ в момент появления его центра в противоположной половине 10 скважины.

Такой механизм возникновения увода оси скважины можно назвать динамическим, поскольку главный вклад в его образование неизбежно вносят динамические факторы. При этом статические факторы, такие как погрешности заточки режущей части инструмента, осевые биения шпинделя станка, могут быть, а могут и не быть. И если они имеют место, то они лишь способствуют ухудшению точности обработки и являются дополняющими в динамическом механизме.

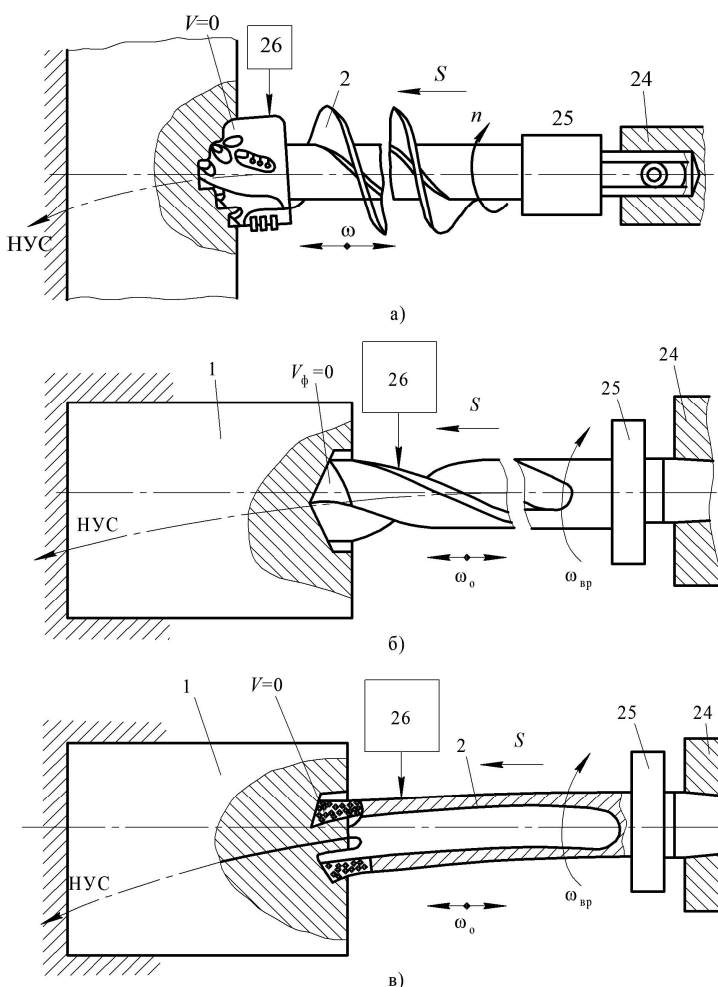


Рис. 5. Схема проведения эксперимента: а – при шнековом бурении; б – при сверлении спиральным сверлом; в – при бурении алмазной коронкой

Выводы

1. Показан главный – динамический механизм возникновения увода оси скважины при ее формообразовании многолезвийным вращающимся инструментом. Суть которого заключается в том, что вибрационное смещение и искривление траектории движения происходит даже у геометрически симметрично заточенного инструмента, симметрия которого нару-

шается кинематически из-за быстрых поперечных его автоколебаний, причем их частота, по крайней мере, должна быть равна или кратна частоте осевых автоколебаний инструмента.

2. Такой подход открывает возможность с единой позиции объяснить механизм формирования погрешностей обработки при проникании любых вращающихся КММИ в твердые сплошные среды. А это, в свою очередь, позволило разработать новый способ [15] обработки, при котором величиной и направлением увода оси скважины (отверстия) можно управлять путем изменения соотношения фаз и частот поперечных и осевых автоколебаний инструмента, обеспечивая требуемую допустимую интенсивность искривления ствола скважины.

Данная статья отражает часть результатов работ, поддержанных РФФИ (проекты №12-08-00981-а и №12-08-31533-мол_а на 2012-14 годы) и федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (госконтракт №14.740.11.1123 от 30.05.2011 г. на 2011-2013 гг.).

Список литературы

1. Копылов В.Е. Бурение? ... Интересно! М.: Недра, 1981. 160 с.
2. Боярко Ю.Л. Борьба с искривлением скважин. Томск: Изд-во ТГУ, 1968. 110 с.
3. Воздвиженский Б.И., Ребрик Б.М. В глубь земли. Разведочное бурение – от прошлого к будущему. М.: Недра, 1989. 168 с.
4. Гордиевский Э.Н. Краткое руководство для бурового мастера механического колонкового бурения. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1969. 512 с.
5. Калинин А.Г. Искривление буровых скважин. М.: Гостехиздат, 1963. 308 с.
6. Обработка глубоких отверстий / Н.Ф. Уткин, Ю.И. Кижняев, С.К. Плужников; под ред. Н.Ф. Уткина. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. 269 с.
7. Дальский А.И. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машины. М.: Машиностроение, 1975. 223 с.
8. Осипов А.И. Самоорганизация и хаос: очерк неравновесной термодинамики. М.: Знание, 1986. 64 с.
9. Хакен Г. Синергетика: Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1985. 423 с.
10. Управление динамикой буровой колонны: учеб. пособие / В.Е. Копылов, А.Г. Черемных, Ю.К. Шлык, О.И. Герман. Тюмень: ТГУ, 1985. 119 с.
11. Лакирев С.Г., Хилькевич Я.М., Сергеев С.В. Вибрационная механика процессов сверления – бурения и новые динамические эффекты: монография. Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1993. 286 с.
12. А. с. 1180172 СССР, МКПЗ 3 В 23 В 35/00. Способ обработки отверстий / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, А.И. Карсунцев, В.А. Тарабрин, Челяб. политехн. ин-т. №3712584 / 25-08; заявл. 27.12.83; опубл. 23.09.85. Бюл. №35. 8 с.
13. Решетников Б.А. Совершенствование технологических систем для развертывания отверстий с целью обеспечения высокой точности их расположения: дис. ... канд. техн. наук. Курган: КМИ, 1986. 186 с.
14. А. с. 122088. СССР, МКПЗ 3 В 23 В 35/00. Способ обработки отверстий / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, Б.А. Решетников, В.В. Леванидов; Челяб. политехн. ин-т. №3806651 / 25-08; заявл. 20.07.84; опубл. 30.03.86. Бюл. №12. 4 с.
15. Сергеев С. В. Повышение точности при сверлении отверстий спиральными сверлами путем управления динамическими составляющими процесса: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск: ЧГТУ, 1995. 293 с.

Сведения об авторах

Сергеев Сергей Васильевич – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Технологические процессы и оборудование машиностроительного производства», филиал ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) в г. Усть-Катаве. E-mail: sergeev-sv@list.ru.

Сергеев Юрий Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Электрооборудование и автоматизация производственных процессов», филиал ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) в г. Златоусте. E-mail: kbvt@list.ru.

Решетников Борис Александрович – канд. техн. наук, доц., проф. кафедры «Технологические процессы и оборудование машиностроительного производства», филиал ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) в г. Усть-Катаве. E-mail: rba49@mail.ru.

Шаламов Виктор Георгиевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), г. Челябинск. E-mail: kbvt@list.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ANALYSIS OF MECHANISMS OF PROCESSING ERROR FORMATION IN PENETRATING OF ROTATING MULTIBLADE BODIES INTO SOLID CONTINUUM

Sergeev Sergey Vasiljevich – Ph.D. (Eng.), assistant professor, Head of Production Technology and Equipment Engineering Industry department, South Ural State University (National Research University) Branch in Ust-Katav. E-mail: sergeev-sv@list.ru.

Sergeev Yuriy Sergeevich – Ph.D. (Eng.), assistant professor, Electrical Equipment and Automation of Production Processes department, South Ural State University (National Research University) Branch in Zlatoust. E-mail: kbvt@list.ru.

Reshetnikov Boris Aleksandrovich – Ph.D. (Eng.), professor, Production Technology and Equipment Engineering Industry department, South Ural State University (National Research University) Branch in Ust-Katav. E-mail: rba49@mail.ru.

Shalamov Viktor Georgievich – D.Sc. (Eng.), professor, Technology of Mechanical Engineering department, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk. E-mail: kbvt@list.ru.

Abstract. Regularities and the main mechanism of the dynamic errors of the longitudinal and transverse form of wells and holes in processing of end-dimensional rotating by multiple tools have been opened and identified. This will allow to develop mathematical models to calculate the accuracy of forming holes and wells with the help of such instruments taking into account main dynamic factors. These models will form the basis of the unified physical theory of such processes.

Keywords: rotary drilling and cutting tools, the dynamic mechanism of processing errors, transverse and axial oscillations tool.

References

1. Kopylov V.E. *Burenie? ... Interesno! [Drilling? ... I wonder!]*. Moscow: Nedra, 1981, 160 p.
2. Boyarko Y.L. *Bor'ba s iskrivleniem skvazhin. [Fighting deviated wells]*. Tomsk: Publ. TSU, 1968, 110 p.
3. Vozdvigenskiy B.I., Rebrik B.M. *V glub' zemli. Razvedochnoe burenie – ot proshlogo k budushhemu. [In the depths of the earth. Exploratory drilling – from past to future]*. Moscow: Nedra, 1989, 168 p.
4. Gordievsky E.N. *Kratkoe rukovodstvo dlya burovogo мастера mekhanicheskogo kolonkovogo burenia. [Quick Reference Guide for driller mechanical core drilling]*. Moscow: Nauka, 1969, 512 p.
5. Kalinin A.G. *Curvature of boreholes*. Moscow, 1963, 308 p.
6. Utkin N.F., Kizhnyayev Y.I., Pluzhnikov S.K. ed. Utkin N.F. *Obrabotka glubokikh otverstij [Treatment of deep holes]*. Leningrad, 1988. 269 p.
7. Dalsky A.I. *Tekhnologicheskoe obespechenie nadezhnosti vysokotochnykh detalej mashiny [Technology to ensure reliability of precision machine parts]*. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 223 p.
8. Osipov A.I. *Samoorganizatsiya i khaos: ocherk neravnomernoj termodinamiki [Self-organization and chaos: irregular outline of thermodynamics]* Moscow: Knowledge, 1986. 64 p.
9. Haken H. *Sinergetika: Ierarkhii neustojchivostej v samoorganizuyushhikhsya sistemakh i ustroystvakh [Synergetics: Hierarchy of instabilities in self-organizing systems and devices]*. Moscow, 1985. 423 p.
10. Kopylov V.E., Cheremnykh A.G., Shlyk J.K., Herman O.I. *Upravlenie dinamikoj buril'noj kolonny [Drillstring dynamics control: the manual]*. Tyumen: TGU, 1985, 119 p.
11. Lakirev S.G., Khilkevich J.M., Sergeev S.V. *Vibratsionnaya mekhanika protsessov sverleniya – burenia i novye dinamicheskie ehffekty [Vibration mechanics of drilling – drilling and new dynamic effects: monograph]*. Chelyabinsk: CSTU, 1993, 286 p.
12. Lakirev S.G., Khilkevich J.M., Karsuntsev A.I., Tarabrin V.A. *Sposob obrabotki otverstij [A method of processing holes]*. A.S. USSR, no. 1180172, 1985.
13. Reshetnikov B.A. *Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh sistem dlya razvertyvaniya otverstij s tsel'yu obespecheniya vysokoj tochnosti ikh raspolozheniya [Improved technology systems for reaming in order to ensure high accuracy of their location]*. Dis. Kurgan, 1986. 186 p.
14. Lakirev S.G., Khilkevich Y.M., Reshetnikov B.A., Levanidov V.V. *Sposob obrabotki otverstij [A method of processing of the holes]*. A.S. USSR, no. 122,088, 1986.
15. Sergeev S.V. *Povyshenie tochnosti pri sverlenii otverstij spiral'nymi sverlami putem upravleniya dinamicheskimi sostavlyayushhimi protsessa [Improved accuracy when drilling twist drills by controlling the dynamic of the constituent process]*. Dis. Chelyabinsk, 1995, 293 p.

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 621.314

Гельман М.В., Брылина О.Г.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. Данная статья посвящена применению виртуального моделирования в математическом пакете MatLab + Simulink, используемого при изучении курса «Силовая электроника». Рассмотрены особенности и преимущества виртуального моделирования. На примере одной лабораторной работы «Исследование однокомплектного рекуперирующего преобразователя» показаны некоторые возможности математического пакета. Сочетание виртуальных лабораторных работ и лабораторных работ, выполняемых на физических стендах, позволяет повысить качество обучения, а также развить интерес у учащихся высших учебных заведений.

Ключевые слова: силовая электроника, MatLab + Simulink, имитационное моделирование, однокомплектный рекуперирующий преобразователь.

Силовая электроника приобретает все большее значение при подготовке специалистов в области электротехники. На кафедре электропривода и автоматизации промышленных установок Южно-Уральского государственного университета при изучении курса «Силовая электроника», как и в других вузах, уже много лет используется не только физическое, но и виртуальное моделирование в среде MatLab+Simulink [1-6].

Разработанные модели непрерывно совершенствуются и развиваются в соответствии с новыми версиями пакета Matlab+Simulink.

Виртуальное (имитационное) моделирование позволяет дополнить возможности физического моделирования.

Достоинства виртуального моделирования:

1) возможность исследования преобразователей с параметрами, соответствующими любой мощности, что обеспечивает возможность получения реальных характеристик;

2) возможность изменения параметров исследуемых систем в широких пределах, включая аварийные режимы работы;

3) доступность измерения параметров режима практически любого узла схемы;

4) возможность реализации любых сложных измерений (спектрального состава, составляющих мощности, коэффициентов несинусоидальности, гармоник, КПД и т.п.);

5) гибкая, легко изменяемая структура; возможность использования изученных моделей звеньев в многозвенных структурах;

6) возможность индивидуализации обучения (большое число вариантов любой сложности);

7) возможность обучения на одних и тех же моделях бакалавров и магистров путем изменения глубины исследования;

8) простота и дешевизна развития лабораторных работ после начальных вложений.

Наличие физических моделей позволяет легко проверить адекватность виртуальных.

Лабораторный комплекс включает в себя работы, посвященные исследованию: однофазных и трехфазных управляемых и неуправляемых выпрямителей, ведомых инверторов, реверсивных преобразователей, преобразователей постоянного напряжения, автономных инверторов напряжения, преобразователей частоты, обратимых преобразователей напряжения (активных выпрямителей).

Особое внимание в работах уделяется энергетическим показателям и путям их улучшения.

Проведение виртуальной лабораторной работы подразумевает наличие двух этапов:

1. Выполнение предварительного домашнего задания:

а) изучение теоретического материала по соответствующей теме курса;

б) предварительный домашний расчет основных параметров изучаемой системы и построение характеристик (регулируемых, внешних или энергетических) по приближенным формулам, полученным при общепринятых допущениях [6].

2. Экспериментальное исследование на базе виртуальных моделей.

Для примера рассмотрим работу «Исследование однокомплектного рекуперирующего преобразователя», в которой особое внимание уделено вопросам энергообмена и энергетическим показателям:

На рис. 1 приведена принципиальная схема и модель рекуперирующего преобразователя. В блоке VIP производится обработка сигналов, снимаемых с элементов схемы. В блоке EDS система автоматического регулирования ЭДС (противо ЭДС) позволяет либо стабилизировать ток нагрузки, либо изменять его по заданному закону в зависимости от положения ключа Switch 2.

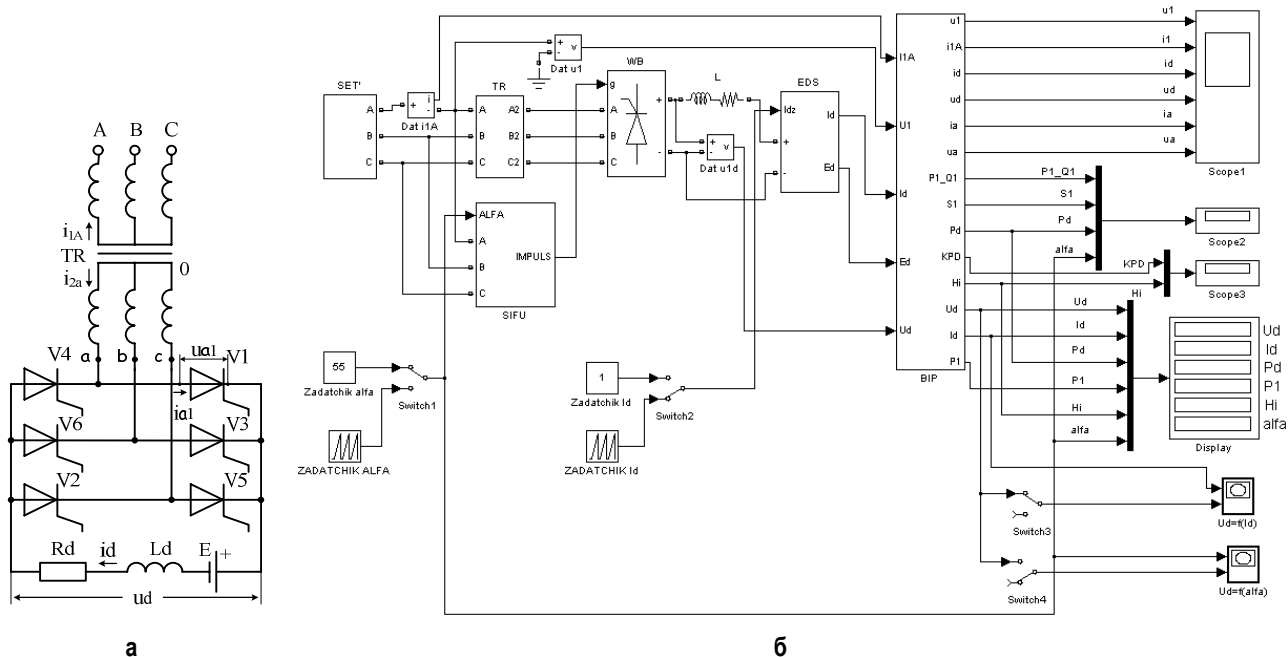


Рис. 1. Схема однофазного рекуперирющего преобразователя (а) и его виртуальная модель (б), предназначенная для исследования

При нижнем положении ключей Switch 1, Switch 3 и верхнем Switch 2 модель обеспечивает изучение перехода от выпрямительного к инверторному режиму и одновременное снятие регулировочной и энергетических характеристик при постоянстве тока нагрузки. Постоянство тока нагрузки обеспечивается за счет нагрузки. При переключении ключей происходит снятие внешних и энергетических характеристик при заданных углах управления, а также снятие и построение ограничительной характеристики.

При некотором изменении модели и учете внутреннего сопротивления сети производится исследование влияния преобразователя на питающую сеть. Определяется спектр гармоник и качество напряжения сети. Исследуется влияние различных факторов на качество напряжения питающей сети.

На рис. 2 приведены осциллограммы, поясняющие работу схемы. При оформлении отчета на осциллограммах рекомендуется отмечать все основные величины и параметры (α , γ , $I_{d \max}$, $U_{a \max}$), характеризующие особенности изучаемой схемы.

На рис. 3 представлены внешние $U_d = f(I_d)$, регулировочные $U_d = f(\alpha)$ и энергетические характеристики $\eta = f(\alpha)$ и $\chi = f(\alpha)$, построенные с помощью графопостроителей и осциллографа. На рис. 4 приведен спектральный состав напряжения сети при работе преобразователя.

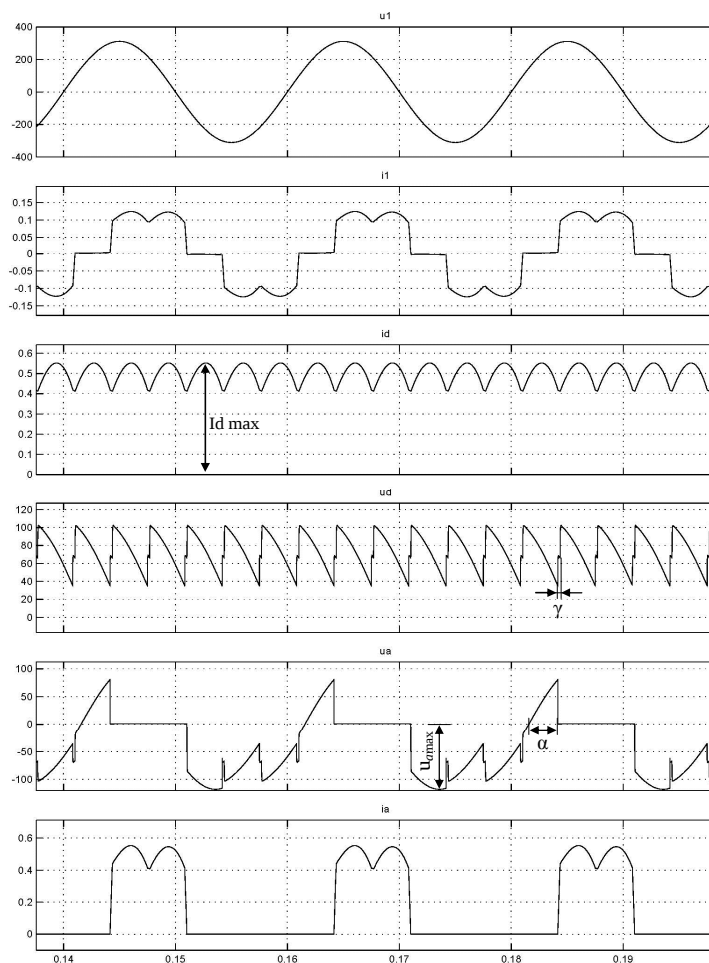


Рис. 2. Осциллограммы процессов в рекуперирующем преобразователе

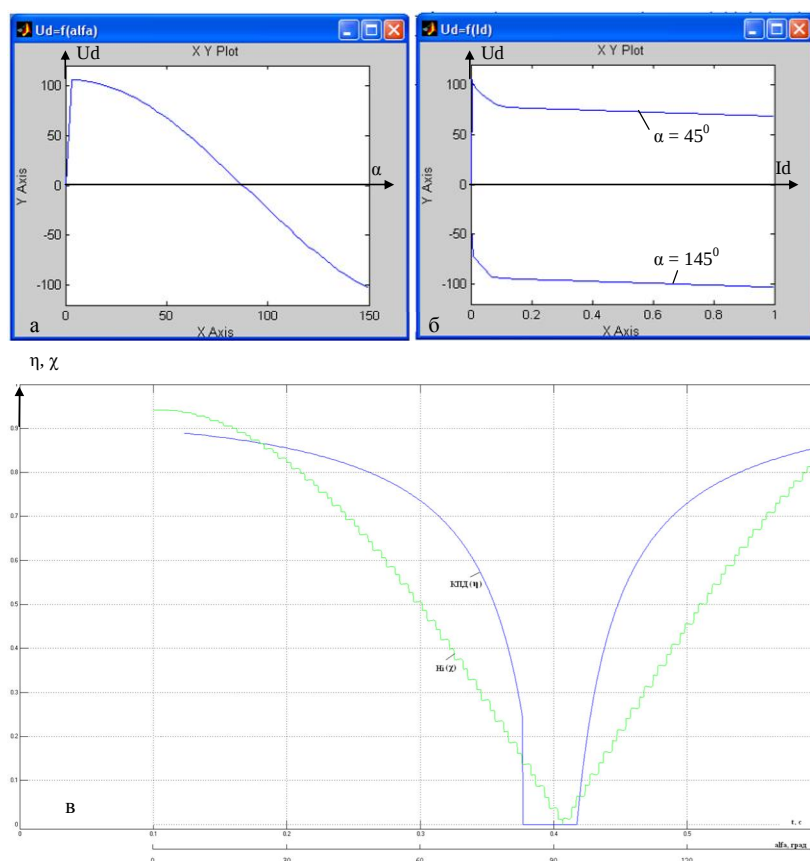
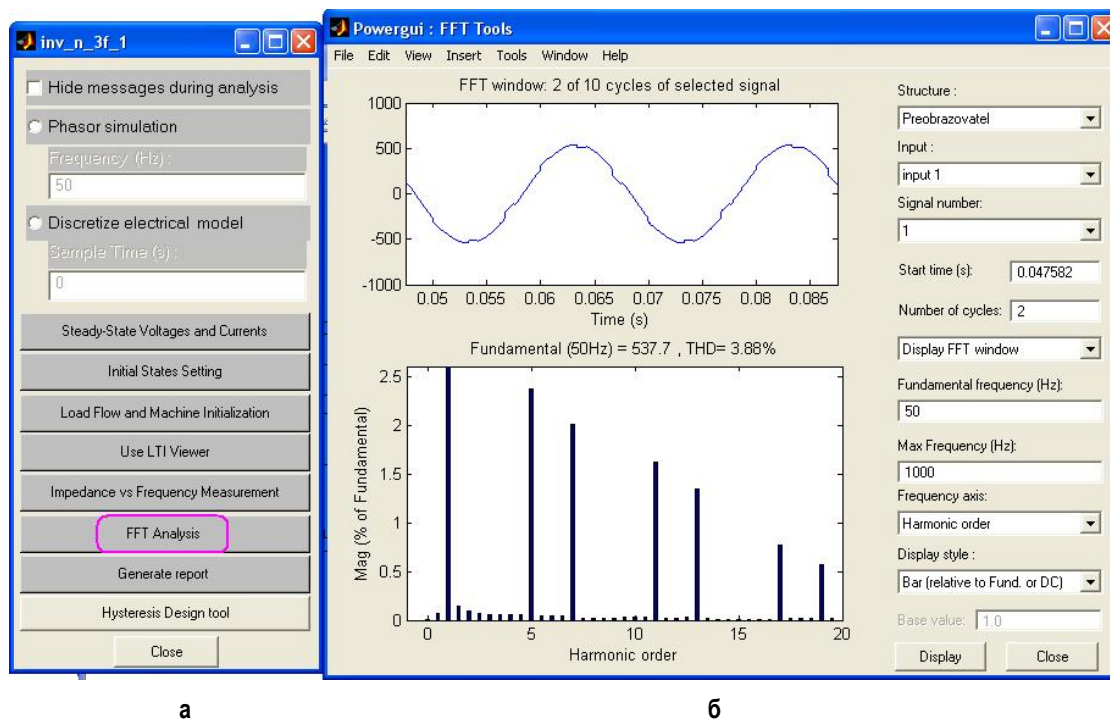


Рис. 3. Пример построения регулировочной (а), внешних (б) и энергетических характеристик (в) рекуперирующего преобразователя



а

б

Рис. 4. Панель инструментов (а) и смотровое окно (б) с временной диаграммой напряжения на входе преобразователя u_1 и разложение кривой напряжения в спектр

Как показала практика, фронтальное проведение виртуальных лабораторных работ превращает общение преподавателя со студентами в творческий процесс, появляется возможность оперативного обмена мнениями сразу со всеми участниками группы. Виртуальное моделирование позволяет легко изменять ход работы, например, преподаватель или сами студенты ставят вопросы и отвечают на них, проведя эксперименты, если не могут ответить на них на основе ранее полученных знаний.

Сочетание виртуальных лабораторных работ и лабораторных работ, выполняемых на физических стендах, созданных совместными усилиями кафедры и ООО НПП «Учтех–Профи» [3, 4], позволяет повысить качество обучения, а также развить интерес у учащихся.

Сведения об авторах

Гельман Морис Владимирович – канд. техн. наук, проф. кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок». Южно-Уральского государственного университета (Национальный исследовательский университет), г. Челябинск. E-mail: mwg@mail.ru.

Брылина Олеся Геннадьевна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Южно-Уральского государственного университета (Национальный исследовательский университет), г. Челябинск. E-mail: teolge@mail.ru.

Список литературы

1. Гельман М.В., Хроменков М.А. Комплекс лабораторных работ по курсу «Преобразовательная техника на основе компьютерного моделирования». Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. трудов. Вып. 6 / под. ред. Сарварова А.С., Одинцова К.Э. Магнитогорск: МГТУ, 2001. С. 221-225.
2. Комплексный автоматизированный стенд для изучения физических основ электроники и преобразовательной техники / Гельман М.В., Хусаинов Р.З., Дудкин М.М., Терещина О.Г. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2007. Вып. 7. №12(84). С. 19-24.
3. Совместное применение физического и виртуального моделирования при изучении устройств преобразовательной техники / Гельман М.В., Хусаинов Р.З., Дудкин М.М., Терещина О.Г. // Изв. вузов. Электромеханика. 2007. Вып. 5. С. 62-65.
4. Гельман М.В., Брылина О.Г., Дудкин М.М. Комплекс виртуальных лабораторных работ по преобразовательной технике. Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 18. под ред. Радионова А.А. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. С. 41-49.
5. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника: лабораторные работы на ПК. СПб.: КОРОНА принт, 2007. 300 с.
6. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 368 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

POWER ELECTRONICS DEVICES RESEARCH USING SIMULATION MODELING

Gelman Moris Vladimirovich – Ph.D. (Eng.), professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations department, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk. E-mail: mwg30@mail.ru.

Brylina Olesya Gennadevna – Ph.D. (Eng.), associate professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations department, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk. E-mail: teolge@mail.ru.

Abstract. The virtual simulation in a technical computing environment MatLab + Simulink is considered in this article. The virtual simulation is used in the course of «Power Electronics». The features and advantages of virtual simulation have been considered. Some features of MatLab have been shown on the example of one laboratory work. It is «The study of one complete regenerating converter». The combination of the virtual laboratory works and the «physical» laboratory works allows to increase the quality of training and to cause student interest at higher educational institutions.

Keywords: power electronics, MatLab + Simulink, simulation modeling, one complete regenerating converter.

References

1. Gelman M.V., Hromenkov M.A. Complex laboratory work by the course of Power Electronics based on the computer modeling. *EHlektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы: mezhvuz. sb. nauch. trudov.* [Electromechanical systems and complexes: Interuniversity collection of scientific papers]. Magnitogorsk, 2001, vol. 6 pp. 221-225.
2. Gelman M.V., Husainov R.Z., Dudkin M.M., Tereschina O.G. Complex automated stand for studying of the physical basis of electronics and power electronics. *Vestnik YUUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of SUSU. Series «Power engineering»]. 2007, vol 7, no. 12(84), pp. 19-24.
3. Gelman M.V., Husainov R.Z., Dudkin M.M., Tereschina O.G. The combined use of physical and virtual simulation in the study of power electronics. *Izv. vuzov. EHlektromekhanika* [Izv. High schools. Electromechanics]. 2007, vol. 5, pp.62-65.
4. Gelman M.V., Brylina O.G., Dudkin M.M. Complex virtual laboratory works by the course of Power Electronics. *EHlektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Electromechanical systems and complexes: Interuniversity collection of scientific papers]. Magnitogorsk, 2010, vol. 18, pp. 41-49.
5. German-Galkin S.G. *Silovaya ehlektronika: laboratornye raboty na PK.* [Power electronics: laboratory works on the PC]. St.Petersburg: Korona print, 2007. 300 p.
6. German-Galkin S.G. *Matlab & Simulink. Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK* [Matlab & Simulink. Designing mechatronic system on PC]. St.Petersburg: Korona-Vek, 2008. 368 p.

УДК 666.92.041

Копцев В.В.

ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА ИЗВЕСТНЯКОВООБЖИГАТЕЛЬНЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ

Аннотация. Автором предложены конструкции новых горелочных устройств на базе сопла с центральным телом типа ГГТ (горелка газовая турбулентная) и ГЦТ (горелка с центральным телом). В статье рассмотрены области применения горелочных устройств типа ГГТ и ГЦТ, приведены основные принципы теории высокоскоростного энергосберегающего сжигания природного газа. Разработанные горелки типа ГГТ и ГЦТ и их модификации, применяемые во вращающихся известняковообжиговых и цементных печах, используют кроме так называемого «нормального» горения элементы детонационного горения. Этот эффект достигается за счет образования пересекающихся скачков уплотнения с созданием мощной волны (ударной адиабаты или адиабаты Гюгонно), приводящей к ускоренному нагреву смеси. Приведены конструктивные особенности разработанных горелочных устройств, использование которых на протяжении многих лет приносит значительный экономический эффект

Ключевые слова: вращающиеся печи, известь, высокоскоростные энергосберегающие горелочные устройства, теория высокоскоростного энергосберегающего сжигания природного газа.

Известь, получаемая в результате обжига известняка, является необходимым материалом для любого сталеплавильного процесса. В большинстве случаев качественную металлургическую известь получают во вращающихся газовых известняковообжиговых печах. Громадный объем выплавляемого в Российской Федерации металла требует для своей обработки большого количества извести, и, следовательно, снижение удельных затрат при ее производстве является неизменно актуальным в плане энергосбережения. Одним из путей совершенствования технологии производства качественной металлургической извести во вращающихся газовых известняковообжиговых печах является применение высокоскоростных энергосберегающих горелочных устройств на базе сопла с центральным телом.

Автором предложены конструкции новых горелочных устройств на базе сопла с центральным телом типа ГГТ (горелка газовая турбулентная) и ГЦТ (горелка с центральным телом). В основу их конструкций положена теория, рассматривающая условия горения высокоскоростных потоков газа, позволяющая создать методику расчета высокоэффективных энергосберегающих высокоскоростных горелочных устройств на базе сопла с центральным телом [1-3]. Конструкция головки горелочного устройства типа ГЦТ подобна соплу с центральным телом турбореактивного двигателя (ТРД). Отличие предлагаемой конструкции сопла горелки с центральным телом от классического варианта сопла ТРД заключается в том, что вместо профилированных поверхностей обечайки и центрального тела используются простые в изготовлении конические поверхности, причем конфузор отсутствует. Сопло ГЦТ можно классифицировать как кольцевое сопло с нулевым наклоном минимального сечения с двойным расширением [4]. Подобные сопла с центральным телом находят, в основном, применение в авиапромышленности при изготовлении турбореактивных двигателей. Главное назначение сопла ТРД в аэродинамическом плане – создать однородный поток

газа на выходе, а сопла горелочного устройства ГЦТ – создать структуру потока, наиболее турбулизированного и обладающего эжектирующими свойствами, и подготовить полученную топливно-воздушную смесь к горению. Конструкции горелок ГГТ и ГЦТ защищены патентами [5-9].

Разработанные горелки типа ГГТ и ГЦТ и их модификации, применяемые во вращающихся известняковообжиговых и цементных печах, используют кроме так называемого «нормального» горения элементы детонационного горения.

Нормальное горение газообразного топлива обеспечивается его подготовкой к воспламенению только за счет нагрева подготовленной горючей смеси теплопроводностью. Но в таком случае фронт горения значительно сдвигается вглубь рабочего пространства печи, что и присуще ранее существовавшим горелочным устройствам. Например, при использовании нормального горения хорошо подготовленной смеси его фронт располагается на значительном расстоянии, порядка 10-30 калибров (под калибром понимается диаметр сопла горелки) от среза сопла.

Математическое моделирование гидродинамики истечения газового потока из сопла горелки с центральным телом [10-13] позволило найти рациональные значения ее геометрических параметров, обеспечивающих наилучшее смешение топлива и окислителя, а также создание пересекающихся скачков уплотнения с мощной волной (ударной адиабаты или адиабаты Гюгонно [14]), приводящей к ускоренному нагреву смеси [15]. Подобный – детонационный – нагрев смеси значительно ускоряет этот процесс, тем самым сдвигая начало зоны горения практически на срез сопла.

Опыт эксплуатации вращающихся печей показывает, что эффективность их работы в значительной степени зависит от рационального сжигания большого количества топлива, которое, в свою очередь, зависит от совершенства смешения топлива и окислителя и от температурной подготовки смеси к горению.

Степень внешнего смешения топлива и окислителя в горелках в основном определяется скоростью истечения основного энергоносителя (в данном случае природного газа) и условиями смешения. В предложенных автором горелочных устройствах (рис. 1 и 2) совершенная степень смешения топлива и окислителя базируется на следующем:

1) На выходе трубы горелки формируется поток газа с критической скоростью.

2) Конструкция сопла, предложенная автором, обеспечивает сверхзвуковую скорость истечения газового потока с небольшим числом Маха.

3) В сопле специальной конструкции образуются чередующиеся волны сжатия и разрежения (волны Маха). На их основе создается механизм совершенного перемешивания вдуваемого газа со спутным потоком воздуха для горения, за счет чего обеспечивается минимально достижимая величина коэффициента расхода воздуха, равная 1,02-1,03. Такой коэффициент расхода воздуха свойственен горелочным устройствам с предварительным смешением.

4) За кормовой частью усеченного конуса центрального тела образуется вихрь, что обеспечивает более полное перемешивание вдуваемого газа со спутным потоком воздуха для горения.

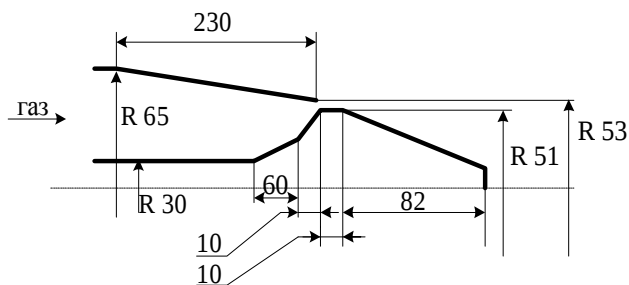


Рис. 1. Схема сопла горелки ГТТ

Горелка ГТТ эксплуатируется на печах известняково-обжигового цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» с 1998 г., а горелка ГЦТ – на печах для обжига доломитизированной извести ОАО «Магнитогорский цементно-обжиговый завод» с 2005 г., многолетняя эксплуатация которых дает значительный экономический эффект.

Сведения об авторе

Копцев Валерий Владимирович – канд. техн. наук, доц. каф. теплотехнических и электрических систем ФГБУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: koptsev2002@mail.ru.

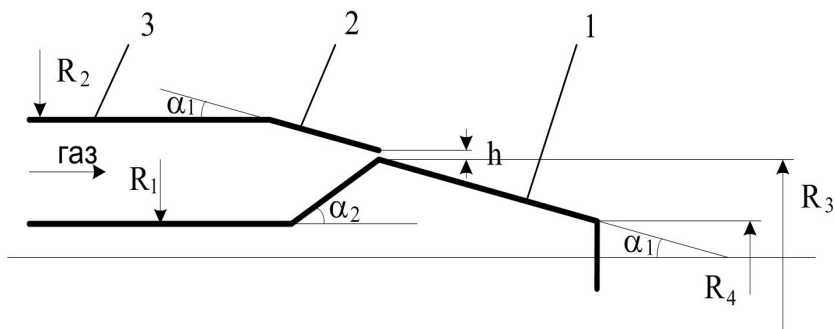


Рис. 2. Схема головки сопла с центральным телом: 1- центральное тело; 2 – обечайка; 3 – цилиндрическая часть трубы горелки; R_1 – радиус штока; R_2 – радиус цилиндрической трубы горелки; R_3 – максимальный радиус конического центрального тела; R_4 – радиус кормовой части конического центрального тела; h – минимальная ширина кольцевого зазора между обечайкой и центральным телом

Список литературы

1. Копцев В.В. Совершенствование горелочных устройств вращающихся печей // Изв. вузов. Черная металлургия. 2003. № 1. С. 52-54.
2. Копцев В.В. Мощные высокоскоростные горелочные устройства для металлургии // Сталь. 2008. № 2. С. 93-95.
3. Копцев В.В. Теория и применение горелочных устройств на базе сопла с центральным телом // Изв. вузов. Черная металлургия. 2008. № 7. С. 46-50.
4. Пиримов У.Г., Росляков Г. С. Течение газа в соплах. М.: Изд-во МГУ, 1978. 288 с.
5. Полезная модель № 14068, МПК Г 23 Д 14/00. Газовая горелка для вращающихся печей / Шатохин И.М., Копцев В.В. // Изобретения. Полезные модели. 2000. № 18. С. 532.
6. Полезная модель № 58660, МПК F 23 Д 14/00. Газовая горелка для вращающихся печей / Копцев В.В. // Изобретения. Полезные модели. 2006. № 33. С. 523.
7. Полезная модель № 61286, МПК Г 23 Д 14/00. Газовая горелка / Копцев В.В., Казаков О.В., Горбулин В.Н., Морозов А.П. // Изобретения. Полезные модели. 2006. № 34. С. 523.
8. Полезная модель № 61286, МПК F27 В 11/00. Колпаковая печь / Копцев В.В. // Изобретения. Полезные модели. 2007. № 6. С. 608.
9. Полезная модель № 63493, МПК F23 D 114/00. Горелка – теплогенератор / Копцев В.В. // Изобретения. Полезные модели. 2007. № 15. С. 812-813.
10. Копцев В.В. Моделирование аэродинамики горелочных устройств вращающихся печей // Металлург. 2004. № 11. С. 37-41.
11. Копцев В.В., Копцев А.В. К расчету газовой горелки // Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии: материалы 2-й международной научно-практической конференции, 35 декабря 2002 г. Москва, 2002. С. 181-183.
12. Копцев В.В. Исследование аэродинамики сопла горелочного устройства с центральным телом // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. №2 (14). С. 56-59.
13. Копцев В.В., Копцев А.В. Математическое моделирование газодинамики горелочного устройства вращающейся печи // Состояние и перспективы электротехнологии: тез. докл. Международной научно-технической конференции (XI Бенардосовские чтения), 4-6 июня 2003. Иваново, 2003. С. 95.
14. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: учебник для вузов. Изд. 6-е, перераб. и доп. М.: Наука, 1987. 840 с.
15. Копцев В.В. Методика расчета горелочных устройств на базе сопла с центральным телом // Вестник СамГТУ. Серия «Физико-математические науки». 2007. № 1 (14). С. 148-154.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

HIGH-SPEED ENERGY-EFFICIENT BURNER DEVICES BURNER ARRANGEMENTS FOR ROTARY LIME AND ROTARY CEMENT KILNS

Koptsev Valery Vladimirovich – Ph.D. (Eng.), the associate professor, Heat and Electrical System Engineering department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. E-mail: koptsev2002@mail.ru.

Abstract. The author offered designs of new burners on the basis of a nozzle with the central body such as NFB (the turbulent firing burner) and CBN (the centerbody nozzle). The article deals with the application of burner's types NFB and CBN, and the basic principles of the theory of high-speed energy-efficient natural gas combustion are given. Designed burners NFB and CBN and their modifications utilized in rotary lime and rotary cement kilns use the so-called «normal» combustion as well as elements of detonation combustion. This effect is achieved through the formation of crossed shock with the creation of a powerful wave (the shock adiabat or Hugoniot adiabat), resulting in accelerated heating of the mixture. Constructive features of designed burners, which are used over the years and bring significant economic benefits, are represented.

Keywords: rotating furnaces, lime, burning apparatus of high-speed energy saving, theory of high-speed energy saving burning of natural gas.

References

1. Koptsev V.V. Sovershenstvovanie gorelochnykh ustroystv vrashhayushhikhsya pechej [Improvement of burning apparatus of rotating furnaces]. *Izv. higher education institutions. Ferrous metallurgy*. 2003, no. 1, pp. 52-54.
2. Koptsev V.V. Moshhnye vysokoskorostnye gorelochnye ustrojstva dlya metallurgii [Powerful high-speed burning apparatus for metallurgy]. *Steel*. 2008, no. 2, pp. 93-95.
3. Koptsev V.V. Teoriya i primeneniye gorelochnykh ustroystv na baze sopla s tsentral'nym telom [The theory and use of burning apparatus on the basis of a nozzle with the central body]. *Izv. Higher education institutions. Ferrous metallurgy*. 2008, no. 7, pp. 46-50.
4. Pirumov U.G. Roslyakov G.S. *Technie gaza v soplakh* [Gas current in nozzles]. Moscow, 1978. 288 p.
5. Shatokhin I.M., Koptsev V.V. Useful model no. 14068, MPK G 23 D 14/00. Gas torch for rotating Furnaces. *Inventions. Useful models*. 2000, no. 18, p. 532.
6. Koptsev V.V. Useful model no. 58660, MPK F 23 D 14/00. Gas torch for rotating Furnaces. *Inventions. Useful models*. 2006, no. 33, p. 523.
7. Koptsev V.V., Kozakov O.B., Gorbulin V.N., Morozov A.P. Useful model no. 61286, MPK G 23 D 14/00. Gas Torch. *Inventions. Useful models*. 2006, no. 34, p. 523.
8. Koptsev V.V. Useful model no. 61286 MPK F27 B 11/00 Bell-type Furnace. *Inventions. Useful models*. 2007, no. 6, p. 608.
9. Koptsev V.V. The useful torch model no. 63493, MPK F23 D 114/00. Heatgenerator. *Inventions. Useful models*. 2007, no. 15, pp. 812-813.
10. Koptsev V.V. Modelirovaniye aehrodinamiki gorelochnykh ustroystv vrashhayushhikhsya pechej [Modeling of aerodynamics of burning apparatus of rotating furnaces]. *Metallurgist*. 2004, no. 11, pp. 37-41.
11. Koptsev V.V., Koptsev A.V. K raschetu gazovoj gorelki [To calculation of a gas torch]. *The Automated oven units and energy saving technologies in metallurgy: materials of the 2nd international scientific and practical conference*. 35 December, 2002, Moscow, 2002, pp. 181-183.
12. Koptsev V.V. Issledovanie aehrodinamiki sopla gorelochnogo ustrojstva s tsentral'nym telom [Research of aerodynamics of a nozzle of the burning apparatus with the central body]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2006, no. 2 (14). pp. 56-59.
13. Koptsev V.V., Koptsev A.V. Matematicheskoe modelirovaniye gazodinamiki gorelochnogo ustrojstva vrashhayushheysya pechi [Mathematical modeling of gas dynamics of the burning apparatus of the rotating furnace]. *Condition and electrotechnology prospects. International scientific and technical conference (the XI Benardosovsky readings)*, on June 4-6, 2003, Ivanovo, 2003, pp. 95.
14. Loytsyansky L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza: uchebnyy dlya vuzov* [Mechanics of liquid and gas]. Moscow: Science, 1987, 840 p.
15. Koptsev V.V. Metodika rascheta gorelochnykh ustroystv na baze sopla s tsentral'nym telom [Methodik of counting burning apparatus based on nozzle with central body]. *Vestnik SamGTU*, 2007, no. 1 (14), pp. 148-154.

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ

УДК 657.421.32

Богатырев С.Ю.

ОЦЕНКА ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО КАПИТАЛА РОССИЙСКИХ ИННОВАЦИОННЫХ КОМПАНИЙ

Аннотация. Раскрываются теоретические основы оценки человеческого и интеллектуального капитала российских инновационных компаний, выбираются компании, квалитетрический аппарат измерения ИК, проводится расчет на национальной информационной базе показателей ИК, делаются выводы об использовании рассчитанного показателя в оценочной науке.

Ключевые слова: человеческий капитал, интеллектуальный капитал, оценка стоимости интеллектуального капитала, сравнительный подход, инновационная компания, измерение интеллектуального капитала, интеллектуальные ресурсы, неосозаемые активы, уровень интеллектуального капитала

Влияние человеческого и интеллектуального капитала на рост российских инновационных компаний было изучено в рамках научно-исследовательской работы (НИР), проводимой в Финансовом университете при Правительстве РФ. Теоретический и методологический материал стоимостной оценки человеческого и интеллектуального капитала был исследован на практическом массиве, отобранном на основании списков и рейтингов информационных агентств, занимающихся разработкой темы инновационных компаний.

Конкретные расчеты были проведены на основании информации по двум российским компаниям, работающим в инновационном секторе российской экономики: одна – разработка новых технологий переработки сырья при производстве и реализации современной продуктовой упаковки; вторая – изготовление и продажа высокотехнологичных изделий из металла через интернет-портал. Первая компания также имеет в своем составе интернет-подразделение. Эти примеры практически значимы, потому что фирмы участвуют в полном технологическом и экономическом цикле: они сами занимаются разработкой продукта, сами налаживают его производство, заказывают оборудование или компоненты продукта из-за рубежа. Сами производят коммерциализацию ноу-хау, запускают торговый цикл или через свою логистическую и сбытовую реальную, или виртуальную сеть.

Актуальность исследований в этом направлении обусловлена поставленными руководством страны задачами по интенсификации инновационного развития российских компаний. В настоящий момент наблюдается значительное инновационное отставание страны на международной арене [1]. Проблемы накопления интеллектуальных ресурсов и управления ими мало решаются российскими предприятиями. Экономические реформы 1990-х гг. разрушили налаженную систему НИОКР предприятий. С 1992 по 2008 гг. на 40% сократилось число организаций, выполняющих научные исследования. Число сотрудников в них уменьшилось на 50%. Затраты на НИОКР российских компаний, в том числе крупных, ничтожны.

Теоретические основы исследования человеческого и интеллектуального капитала

В настоящей исследовательской работе был применен разработанный во Всероссийском заочном финансово-экономическом институте (ВЗФЭИ), недавно вошедшем в состав Финансового университета, уровень интеллектуального капитала (УИК). Этот показатель и связанный с ним термин были предложены в связи с тем, что традиционные определения интеллектуального капитала [2-4] не ориентированы на решение задач по исследованию влияния этих факторов на рост инновационных компаний, так как основной упор в них сделан на подчеркивание смысла явления. Предложенное понятие «уровень интеллектуального капитала» (УИК) компании является сравнительной числовой характеристикой. УИК – это интегральный показатель, определяющий конкурентоспособность предприятия, объединяющий интеллектуальный потенциал, сформированный из человеческих, инфраструктурных, маркетинговых активов и интеллектуальной собственности. То есть УИК – результат реализации работы компании, выраженный добавленной стоимостью за анализируемый период.

При построении УИК [5] изучается и анализируется несколько сторон влияния человеческого и интеллектуального капитала на рост инновационной компании:

1. УИК является одним из интегральных показателей, определяющих способность предприятия осуществлять экспансию на новые сегменты рынка или на новые рынки и осуществлять рост продаж высокотехнологичной продукции, разрабатываемой фирмой.

2. УИК определяется в количественном выражении, рассчитанном за определенный период.

3. УИК интегрирует интеллектуальный потенциал и результат его использования – добавленную стоимость.

4. Интеллектуальный потенциал складывается из четырех групп активов:

- человеческие активы;
- инфраструктурные активы;
- маркетинговые активы;
- интеллектуальная собственность.

УИК обладает высоким квалитетическим потенциалом благодаря его разработчику. Методика показателя основывается на классических подходах к измерению интеллектуального и человеческого капитала, классифицированных Э. Свейби на его персональном сайте (К.Е. Sveiby, 2004). В соответствии с этой классификацией выделяются 25 методов измерения интеллектуального капитала, сгруппированные в четыре категории.

Определение уровня интеллектуального капитала российских компаний

УИК был применен в рамках исследования для определения влияния человеческого и интеллектуального капитала на рост двух российских инновационных компаний. Метод УИК относится к четвертой группе методов измерения интеллектуального капитала по классификации Э. Свейби. Хотя, как указывается автором УИК, количество показателей интеллектуаль-

ного потенциала может меняться с учетом специфики деятельности оцениваемого объекта, первоначальный набор критериев был оставлен без изменения.

Обобщенный показатель УИК был рассчитан с учетом результатов реализации интеллектуального капитала по формуле

$$\text{УИК} = \beta \cdot \text{Кп} + (1 - \beta) \text{ДС} / \text{ДС}_{\max}, \quad (1)$$

где β – значимость интеллектуального потенциала или результатов с точки зрения лица, принимающего решение, $0 \leq \beta \leq 1$; Кп – интеллектуальный потенциал с учетом весов; ДС – добавленная стоимость на объекте за оцениваемый период, руб.; $\text{ДС}_{\max}$ – максимальное значение добавленной стоимости среди сравниваемых объектов, руб.

Результаты применения метода представлены в нижеприведенной таблице. Таблица заполнена на основании данных по двум вышеописанным предприятиям за первое полугодие 2013 года.

Исследование влияния человеческого и интеллектуального капитала на рост российских инновационных компаний на основании УИК

Параметр	Фирма – Упаковка	Фирма – Металлообработка
1. Человеческий капитал		
1.1. Доля работников с высшим образованием, %	33	34
1.2. Доля обучающихся в вузах и колледжах, %	5	6
1.3. Число работников с ученой степенью	6	7
1.4. Доля работников, прошедших повышение квалификации, %	12	13
1.5. Уровень заработной платы, руб. в мес.	42700	42567
1.6. Превышение приростом производительности труда прироста заработной платы, %	1,8	2
1.7. Число предложенных новшеств на одного работника в год	5	6
1.8. Число работников, имеющих ноу-хау	3	3
1.9. Средний стаж работы, лет	6,5	7
1.10. Средний квалификационный разряд рабочих	5	5
1.11. Средний квалификационный разряд ИТР	2	2
1.12. Доля времени на обучение от рабочего фонда времени, %	3	3
1.13. Число полученных работниками из библиотечного фонда организации книг	17	19
1.14. Затраты на повышение квалификации, тыс. руб. в год	415	423
1.15. Число специалистов с несколькими высшими образованиями	4	5
1.16. Средний возраст работников, лет	42	43
1.17. Доля нарушителей трудовой дисциплины, %	1,5	1,8
1.18. Доля неаттестованных рабочих мест, %	22	24
1.19. Количество несчастных случаев	1	1
1.20. Потери рабочего времени, чел.-дней на работника	18	18
1.21. Текучесть кадров, %	14	12
1.22. Число дней, проведенных работниками на больничном	180	190
Итого по группе	0,6644	0,6974
2. Интеллектуальная собственность		
2.1. Число патентов на изобретения	4	6
2.2. Число патентов на промышленные образцы	29	30
2.3. Число патентов на полезные модели	3	4
2.4. Число проданных лицензий	0	0
2.5. Число приобретенных лицензий	1	1
2.6. Число рацпредложений за год	12	7
2.7. Число используемых прикладных программ	7	8
2.8. Число используемых баз данных	6	5
2.9. Число ноу-хау	2	1

Параметр	Фирма – Упаковка	Фирма – Металлообработка
2.10. Оценка деловой репутации организации, баллы	4	3
2.11. Число потерянных секретов	1	0
Итого по группе	0,828	0,78
3. Инфраструктурный капитал		
3.1. Уровень корпоративной культуры, баллов	3	2
3.2. Число созданных кросс-команд	1	1
3.3. Наличие системы непрерывного образования (да – 1, нет – 0)	1	1
3.4. Наличие стратегического плана развития (да – 1, нет – 0)	1	1
3.5. Наличие корпоративной сети (да – 1, нет – 0)	1	1
3.6. Наличие АСУ (да – 1, нет – 0)	1	1
3.7. Число нормативно-технических документов по управлению	16	17
3.8. Наличие сертифицированной системы менеджмента качества (да – 1, нет – 0)	1	1
3.9. Число стандартов предприятия	19	15
3.10. Число действующих кружков качества	4	3
3.11. Наличие системы «точно в срок» (да – 1, нет – 0)	0	0
3.12. Библиотечный фонд организации, тыс. экз.	650	660
3.13. Доля рабочих мест, не имеющих доступа к сети компании, %	15	14
Итого по группе	0,7326	0,6854
4. Маркетинговый капитал		
4.1. Количество постоянных клиентов	45	34
4.2. Количество торговых марок	3	3
4.3. Число заключенных договоров на поставку	12	9
4.4. Имидж предприятия у покупателей, баллов	4	4
4.5. Количество маркетинговых технологий	6	4
4.6. Коэффициент удовлетворенности потребителей	0,72	0,75
4.7. Обращение ценных бумаг на фондовом рынке (да – 1, нет – 0)	0	0
4.8. Число хоздоговоров в сфере НИОКР	1	1
4.9. Число дистрибьюторов и дилеров компании	13	11
4.10. Трафик сайта, Гб в месяц	136	130
4.11. Число представительств за рубежом	3	3
4.12. Место в рейтинге журнала «Эксперт»	0	0
4.13. Число потерянных клиентов	5	6
4.14. Количество судебных разбирательств	2	2
Итого по группе	0,543	0,632
Интеллектуальный потенциал с учетом весов	0,692	0,6987
Добавленная стоимость, млн руб.	445,6	345,6
УИК при значении $\beta = 0,5$	0,7916	0,69495

Выводы и перспективы применения

По полученным результатам видно, что УИК оказался выше у компании упаковочного сегмента, причем она является не только более дорогостоящей, но и более быстрорастущей. Темп прироста продаж у неё составляет 15% в год, что на 3,5% выше фирмы металлических изделий.

При анализе многих показателей человеческого и интеллектуального капитала была выявлена слабая фактологическая и доказательная информационная база. Учет многих показателей вообще не ведётся.

Таким образом, перспективы дальнейшей разработки учета влияния интеллектуального и человеческого капитала на рост инновационных компаний по квалиметрической методике УИК определяются следующим образом:

1. Разработка и непрерывное ведение учетных регистров показателей человеческого и интеллектуального капитала российских компаний, например в соответствии с применённым в данной статье перечнем.

2. Изучение и расчет показателей добавленной стоимости и среднеотраслевых показателей для расчета УИК в отраслевом масштабе со специализацией по сегментам отрасли, характеру деятельности, характеру инновационности компаний.

3. Разработка методов анализа иерархий, используемых при определении коэффициентов весомости, применяемых в расчете УИК, расширение круга экспертов и технических специалистов, менеджеров при установлении весов. В настоящий момент этой работой занимается экономист – оценщик, что снижает качество оценки многих инновационных и технических параметров.

4. Расчет УИК по широкой выборке инновационных предприятий за многочисленные отчетные периоды, накопление и систематизация информации по влиянию человеческого и интеллектуального капитала на рост и стоимость российских инновационных компаний.

5. Для применения УИК в оценочной науке в рамках сравнительного подхода при отборе инновационных компаний – аналогов необходимо с учетом выполнения предыдущих пунктов составить сравнительные таблицы с указанием основных отраслевых параметров компаний.

Сведения об авторе

Богатырев Семен Юрьевич – канд. экон. наук, доц. кафедры оценки и управления собственностью Финансового университета при Правительстве Российской Федерации. E-mail: sybogatyrev@gmail.com.

Список литературы

1. Богатырев С.Ю. Розничный малый бизнес: выживание через оценку // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им Г.И. Носова. 2011. №4. С 91-95.
2. Bontis N. (1999). Managing organizational knowledge by diagnosing intellectual capital: framing and advancing the state of the field. *International Journal of Technology Management*, vol. 18(5-8), pp. 433-462.
3. Стюарт Т. Интеллектуальный капитал. Новый источник богатства организаций / под ред. В.Л. Иноземцева. М.: Academia, 1999.
4. Брукинг Э. Интеллектуальный капитал: ключ к успеху в новом тысячелетии / под ред. Л.Н. Ковачин. СПб.: Питер, 2001. 288 с. Фасхийев Х.А. Модель управления интеллектуальным капиталом предприятия // Менеджмент инноваций. 2011. №2 (14).

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

APPRAISAL OF HUMAN AND INTELLECTUAL CAPITAL OF RUSSIAN INNOVATIVE COMPANIES

Bogatyrev Semon Yurievich – Ph.D. (Economics), associate professor, Evaluation and Property Management department, Financial University under the Russian Federation Government. E-mail: sybogatyrev@gmail.com.

Abstract. Theoretical bases of appraisal of human and intellectual capital of Russian innovative companies have been revealed. Companies, qualimetrical device of intellectual capital measurement have been elected. Calculation on national information base of intellectual capital indicators is carried out and conclusions about the use of the calculated indicator in estimating science are drawn.

Keywords: human capital, intellectual capital, evaluation of the intellectual capital, market approach, innovative company, measurement of the intellectual capital, intellectual resources, intangible assets, intellectual capital level.

References

1. Bogatyrev S.Y. Retail small business: a survival through appraisal. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 4, pp. 91-95.
2. Bontis N. (1999). Managing organizational knowledge by diagnosing intellectual capital: framing and advancing the state of the field. *International Journal of Technology Management*, vol. 18(5-8), pp. 433-462.
3. Stewart T. *Intellektual'nyj kapital. Novyj istochnik bogatstva organizacij*. [Intellectual capital. New source of richness of the organizations]. Ed. V.L. Inozemtsev. Moscow: Academia, 1999.
4. Bruking E. *Intellektual'nyj kapital: ključ k uspehu v novom tysjacheletii* [Intellectual capital: key to success in the new millennium]. Ed. L.N. Kovachin. S. Petersburg: Piter, 2001. 288 p.
5. Faskhiyev H.A. Model of management of the intellectual capital of the enterprise. *Menedzhment innovacij* [Management of innovations]. Moscow: 2011, no. 02 (14).

УДК 338

Еремеев Д.В.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОСВЯЗИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ НАУКОЕМКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ И ЕГО ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА

Аннотация. Существенное изменение внешней экономической среды, вызванное многообразным влиянием различных факторов, требует от руководителей наукоемких предприятий принятия стратегических решений, направленных на получение существенных конкурентных преимуществ за счет развития собственного инновационного потенциала. В публикации исследованы концептуальные теоретико-методические основы и обоснованы взаимосвязи инновационного потенциала и конкурентоспособности наукоемкого предприятия.

Ключевые слова: инновации, инновационное развитие, конкурентоспособность предприятия, инновационный потенциал, наукоемкое предприятие.

Вопросы повышения эффективности деятельности предприятий в условиях переменчивой конкурентной среды являются доминирующими в современных исследованиях. Переход экономики страны на инновационный путь развития предопределяет динамику и уровень конкурентоспособности предприятий внутри отраслей и в мировом хозяйстве. К приоритетным задачам развития экономики промышлен-

ных предприятий относят обеспечение запланированного экономического роста, достижение конкурентоспособности предприятий на мировом уровне, повышение объема инвестиций для целей развития, формирование эффективной инновационной инфраструктуры ведения хозяйства, рост инновационного потенциала, повышение эффективности управления уровнем деловой активности и др.

Необходимость перехода экономики России на инновационный путь развития требует активизации инновационной деятельности и повышения инновационной активности предприятий. Предприятие способно устойчиво функционировать, достигать комплекса стратегических и оперативных целей только в том случае, если происходящие на нем изменения адекватны изменениям внешним, происходящим в конкурентном окружении, отраслевом и региональном ресурсном узле и т.д. Инновационная деятельность рассматривается как важнейший источник развития предприятия, позволяющий повышать его конкурентоспособность, а инновации являются своеобразным индикатором деловой активности, определяя быстро развивающиеся перспективные сектора при условии благоприятного инновационного климата.

На сегодняшний момент инновационная активность промышленных предприятий в Российской Федерации невысокая. Такой вывод можно получить, ознакомившись с данными Росстата (см. таблицу) [5].

Основные показатели инновационной деятельности российских промышленных предприятий, %

№ п/п	Наименование показателя	Год				
		2005	2007	2008	2009	2010
1	Удельный вес организаций, осуществлявших технологические инновации в отчетном году, в общем числе организаций	9,3	9,4	9,6	9,4	9,3
2	Удельный вес инновационных товаров, работ, услуг в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ, услуг	5,0	5,5	5,1	4,6	4,9
3	Удельный вес затрат на технологические инновации в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ, услуг	1,2	1,2	1,4	1,9	1,5
4	Удельный вес организаций, осуществлявших маркетинговые инновации в отчетном году, в общем числе организаций	-	3,5	3,5	3,7	3,4
5	Удельный вес организаций, осуществлявших организационные инновации в отчетном году, в общем числе организаций	-	2,5	2,6	2,4	2,5
6	Удельный вес инновационных товаров, работ, услуг по следующим видам деятельности: добыча полезных ископаемых, обрабатывающие производства, производство и распределение электроэнергии, газа и воды в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ, услуг	5,0	5,5	5,1	4,6	4,9
7	Удельный вес инновационных товаров, работ, услуг по обрабатывающим производствам в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ, услуг	7,0	7,1	6,6	6,1	6,7

Как видно из представленной информации, количество инновационно-активных предприятий, разработавших и внедрявших новые либо усовершенствованные продукты, за последние 5 лет не превышает 5,5%, доля предприятий, внедряющих инновационные технологические процессы, за этот же период не превышает 9,6%. Главным источником финансирования инноваций остаются собственные средства предприятий, что объясняет невысокую долю затрат на технологические инновации от общего объема затрат (максимальное значение – 1,9% в 2009 г.) Данная ситуация объясняется рядом причин, среди которых можно выделить основные: неэффективное расходование средств, несовершенство кредитной системы, отсутствие государственной поддержки инновационной деятельности.

По данным американской некоммерческой исследовательской организации Мемориального института Баттель (Battelle Memorial Institute) мировые расходы на науку и НИОКР в 2011 году выросли на 3,6% и составили \$1,2 трлн. Неоспоримым лидером в этой области уже 40 лет подряд остаются США: их затраты на науку и НИОКР составили треть от мирового объема затрат – \$405,3 млрд или около 2,7% от объема американского ВВП. Китай в 2011 году потратил на исследования и разработки \$153,7 млрд (1,4% ВВП) по сравнению с \$141,4 млрд в 2010 г. и вышел на второе место в мире, потеснив Японию. Расходы на НИОКР в Японии выросли со \$142 млрд. (2010 г.) до \$144,1 млрд. (3,3% ВВП) в 2011 г. Россия замыкает десятку мировых лидеров по расходам на науку: российские затраты на НИОКР выросли с \$22,1 млрд в 2010 г. до \$23,1 млрд в 2011 году, при этом доля этих расходов в ВВП страны останется неизменной – 1%. [1].

Низкий уровень инновационной активности в большой степени затронул и процессы технологического обмена. В приобретении новых технологий участвуют менее тысячи промышленных предприятий, в передаче – несколько десятков. Удельный вес инновационной продукции по промышленности не превышает 5,5% (в 2007 г.) от общего объема отгруженной продукции промышленных предприятий. При этом за последние три года данный показатель снизился. О низкой результативности инновационной деятельности в промышленности свидетельствуют и невысокие показатели экспорта инновационной продукции. В целом, объем мирового рынка наукоемкой продукции оценивается в 2,5-3,0 трлн долл. в год. Доля России на мировом рынке высоких технологий по оценкам экспертов [6] не превышает 0,5%, в то время как доля Германии – 17%, США – 36%, Японии –

32%, что свидетельствует о значительном отставании России от развитых стран, а также показывает сырьевую ориентацию отечественной экономики и низкую конкурентоспособность российских предприятий на международном рынке наукоемкой продукции.

Экспертный анализ [7] показывает, что эффективность реального сектора экономики определяется на 49% внедрением результатов научно-технических исследований и разработок, на 27% – рабочей силой и на 24% – капиталом. На долю новых или усовершенствованных технологий, продукции, оборудования, содержащих новые научные решения, в ведущих странах мира приходится от 70 до 85% прироста валового внутреннего продукта.

Передовая зарубежная и отечественная практика доказала, что в настоящее время основополагающими факторами развития любой хозяйственной системы являются инновационные, в числе которых – новая техника, системные технологии нового типа, новая организация труда и производства, новая мотивационная система [2]. Научно-технический прогресс определяет все стороны функционирования предприятия. Развитие науки и техники неразрывно связано с понятием инновации.

Существует множество направлений инновационного развития предприятия для повышения его конкурентоспособности:

- повышение эффективности работы предприятия: более низкие, чем у ближайших конкурентов производственные издержки, более высокий уровень развития, более высокий уровень системы продвижения продукции;
- инновации производственной продукции, ориентация на ее высокое качество по меньшим, чем у конкурентов, ценам на более дифференцируемые товары, сокращение времени обновления ассортимента и вида продукции;
- функциональные инновации для завоевания устойчивых позиций в мировых торговых цепочках;
- временной интервал инновационного лага у предприятия меньше, чем у конкурентов.

Проведенный автором анализ позволил сформулировать критерии развития современного наукоемкого предприятия для увеличения его конкурентоспособности на открытом рынке:

- высокий инновационный потенциал, соответствующий требуемым темпам развития;
- способность предприятия управлять объектами интеллектуальной собственности в соответствии со стратегическими целями развития;
- возможность внедрения инновационной технологии с учетом перспектив развития предприятия;
- возможность повышения устойчивости развития предприятия на основе реструктуризации выпускаемой продукции, что актуально для предприятий ОПК и технологий двойного назначения;
- наличие у предприятия доступных ресурсных возможностей, соответствующих требованиям развития;
- наличие условий для сохранения инновационного потенциала предприятия.

Учитывая стратегию перехода России на инновационный путь развития, ключевая роль в обеспечении конкурентоспособного развития предприятий, достижении положительной динамики качественных и количественных изменений предприятия отводится именно повышению инновационного потенциала, который характеризует создание наукоемких технологий, обновление производственной базы, освоение выпуска качественно новых, инновационных товаров и услуг, использование нововведений, взаимодействие с научными организациями. Рассмотренные предпосылки позволяют выделить инновационный потенциал в качестве базисного фактора конкурентоспособного развития предприятия.

В рамках глобальной конкуренции производственно-экономических систем инновационный потенциал рассматривается как важнейшее средство воздействия на динамику производительных сил и поэтому составляет «базис» для повышения конкурентоспособности предприятия. Учет потенциальных возможностей, связанных с освоением передовых достижений науки и техники различными звеньями общественного производства, определяет ближайшие и перспективные задачи повышения эффективности народного хозяйства, обеспечения конкурентоспособности российских предприятий, обновления выпускаемой готовой продукции в соответствии с новыми стандартами производственного и непроизводственного потребления. Именно трансформация и комбинация внутренних и внешних факторов, а точнее, нововведения (инновации), как наиболее перспективный вид изменений, который вносит наибольший вклад в повышение эффективности, могут служить базисом для повышения конкурентоспособности наукоемкого предприятия.

К результатам инновационного процесса можно отнести новые продукты (услуги), технологии, формы и методы управления, причем наличие новизны фиксируется со стороны потребителя. Инновационный потенциал обладает свойством концентрировать и направлять разные процессы, происходящие при развитии предприятия, и именно нововведения подходят под роль базисного элемента развития предприятия. Причем необходимо учитывать, что для практического применения в качестве базиса повышения конкурентоспособности необходима динамическая система развития инновационного потенциала. Данная система должна позволять объективно соизмерять темпы развития предприятия (динамику предприятия) и показатели его конкурентоспособности. Важным моментом является то, что современные стратегии экономического развития предполагают переход от реактивного развития (реакция на изменения среды) к концепции активного развития – развитие посредством инноваций (не только реакция на изменение среды, а активная адаптация к будущим изменениям, а также формирование этих будущих изменений). В связи с этим стремительно возрастает влияние повышения инновационного потенциала на развитие организаций, так как все меньше и меньше остается возможности у организаций реагировать существующи-

ми способами и видами продуктов на будущие изменения во внешней среде. Другим важным моментом конкурентного развития предприятия является то, что повышение инновационного потенциала – не только способ реагирования на изменения внешней среды, но также и инструмент планирования, который позволяет формировать будущее. Современные тенденции показывают возможность не только реагировать на изменения внешней среды, но и воздействовать на нее путем формирования новых рынков. Увеличить предел существования организации можно в результате системной инновационной деятельности, рассматривая инновационный потенциал как систему управления, осуществляющую координацию отношений между внутренней и внешней средой и использующую изменения для своей выгоды как фактор новых возможностей и обеспечения устойчивого развития. Таким образом, существует обоснованность и необходимость использования инновационного потенциала в качестве базисного фактора конкурентного развития предприятия. Модель взаимосвязи конкурентоспособности наукоемкого предприятия и его инновационного потенциала заключается в использовании в качестве базиса развития инновационный потенциал, который для обеспечения развития конкурентоспособности необходимо осуществлять в темпе, превышающем рыночный, в рамках ресурсных возможностей предприятия с учетом циклического характера спроса и динамичности изменения ресурсопотребления в процессе освоения инноваций (рис. 1).

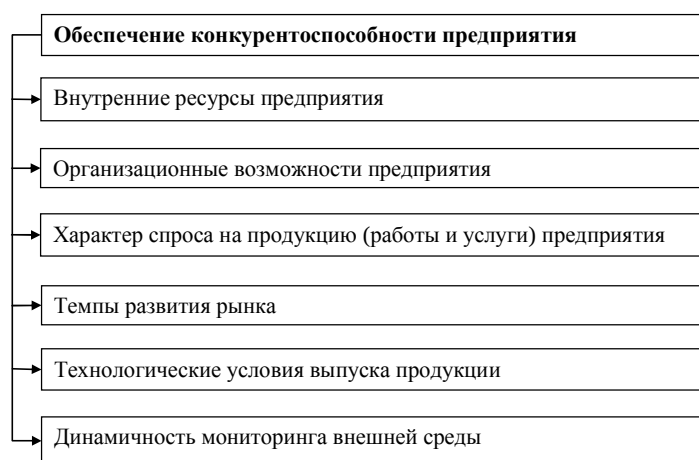


Рис. 1. Составляющие конкурентоспособности предприятия

Существует несколько групп методов, позволяющих оценить уровень конкурентоспособности предприятия:

1. Матричные методы. Данный подход базируется на маркетинговой оценке деятельности предприятия и его продукции. В основе методики – анализ конкурентоспособности с учетом жизненного цикла продукции предприятия.

2. Методы, основанные на оценке конкурентоспособности продукции предприятия. Эта группа методов базируется на суждении о том, что конкурен-

тоспособность предприятия тем выше, чем выше конкурентоспособность его продукции. Для определения конкурентоспособности продукции используются различные маркетинговые и квалиметрические методы, в основе большинства которых лежит нахождение соотношения цена-качество.

3. Методы, основанные на теории эффективной конкуренции. Суть подхода заключается в балльной оценке способностей предприятия по обеспечению конкурентоспособности. Каждая из сформулированных в ходе предварительного анализа способностей предприятия по достижению конкурентных преимуществ оценивается экспертами с точки зрения имеющихся ресурсов.

4. Комплексные методы. Оценка конкурентоспособности предприятия в рамках подобных методов ведется на основании выделения текущей и потенциальной конкурентоспособности предприятия.

Согласно теории экономической и социальной эффективности [4] оценка эффективности функционирования системы должна опираться на ряд последующих этапов определения технического, технологического, организационного видов эффективности. При этом каждый из этапов проводится по соответствующему критерию: техническому, технологическому, организационному. На каждом этапе производится выбор наиболее целесообразной с соответствующей точки зрения системы. И только на последнем этапе проводится экономический анализ, который должен учитывать не только цену производства, но и цену потребления данной системы.

В свою очередь, существует определенная методическая сложность в определении уровня конкурентоспособности отдельных предприятий.

В рамках системного подхода оценка конкурентоспособности рассматривается в условиях сложной структуры. С учетом целевой направленности рассматриваемые показатели разбиты на три категории: показатели входного воздействия, показатели состояния, показатели управления. Первые характеризуют человеческую деятельность, процессы и характеристики, которые влияют на инновационное развитие наукоемкого предприятия. Вторые характеризуют текущее состояние различных аспектов инновационного развития. Третьи – индикаторы реагирования, позволяющие осуществлять выбор среди нескольких альтернатив как способ реагирования для изменения текущего состояния. Критерием выбора является изменения конкурентоспособности предприятия.

Предложенная автором концептуальная модель взаимосвязи конкурентоспособности наукоемкого предприятия и его инновационного потенциала (рис. 2) предполагает организацию процесса эффективной адаптации предприятия к внешней среде и его обеспечения конкурентоспособности посредством применения методологического инструментария формирования и эффективного использования инновационного потенциала.



Рис. 2. Концептуальная модель исследования взаимосвязи инновационного потенциала и конкурентоспособности наукоемкого предприятия

В рамках данной концепции для обеспечения конкурентоспособности необходимо отслеживать параметры, характеризующие состояние инновационного потенциала наукоемкого предприятия и его соответствие внешней среде.

В основу построения концепции положены следующие принципы [3]:

- целенаправленность, заключающаяся в том, что характеристика любых изменений в инновационной деятельности должна оцениваться с позиций приоритетности конечной цели этой деятельности, которая состоит в выявлении ресурсов конкурентного развития предприятия; комплексность, которая заключается в охвате всех ресурсов, затрат и результатов инновационной деятельности для обеспечения конкурентного развития предприятия;

- динамизм, т.е. учет происходящих быстрых изменений в развитии предприятия и состоянии его инновационных процессов;

- экономичность, заключающаяся в требовании получения реального коммерческого и/или бюджетного эффекта от использования аналитических оценок инновационного потенциала;

- инновационность, заключающаяся в использовании процессов создания, приобретения, освоения и внедрения результатов инновационной деятельности для обеспечения конкурентного развития предприятия.

Концепция включает в себя следующие элементы обеспечения конкурентоспособного развития предприятия: комплексная оценка инновационного потенциала наукоемкого предприятия; модель формирования инновационного потенциала наукоемкого предприятия; оценка эффективности использования инновационного потенциала наукоемкого предприятия; исследования взаимосвязи и влияния роста инновационного потенциала на конкурентоспособность предприятия; разработка и внедрение стратегии инновационного развития; оценка ресурсов для инновационного развития; сравнительный анализ конкурентоспособности предприятия при инновационном развитии

наукоемкого предприятия; мониторинг инновационных процессов. Применение концепции увеличения конкурентоспособности наукоемкого предприятия на основе повышения инновационного потенциала позволяет увязать инновационный процесс развития экономического субъекта со стратегическими целями конкурентного развития предприятия.

В современных условиях рыночных отношений наукоемкому предприятию необходимо осуществлять постоянное инновационное развитие, которое обусловлено поддержанием конкурентного статуса, а также спецификой его функционирования, когда в условиях научно-технического прогресса происходит быстрый износ и устаревание основных производственных фондов, применяемых технологий, организационных и управленческих структур.

Список литературы

1. «Вести» интернет-газета («VESTI.RU»). 2001-2013. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.vesti.ru/doc.html?id=414734>.
2. Багриновский К.А., Бендиков М.А., Хрусталев Е.Ю. Механизмы технологического развития экономики России. М.: Наука, 2003.
3. Колосова Т.В. Обеспечение устойчивого предприятия на основе повышения его инновационного потенциала: дис. ... д-ра экон. наук. Нижний Новгород, 2011.
4. Колосова Т.В., Овчинников П.А. Организация управления предприятиями на основе формирования стратегических бизнес-единиц // Основные направления повышения эффективности экономики, управления и качества подготовки специалистов: сб. статей IV Междунар. науч.-практ. конф. Пенза: Филиал ВЗФЭИ, 2006.
5. Российский статистический ежегодник 2011. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.gks.ru/bgd/regl/b11_13/IssWWW.exe/Stg/d5/21-42.
6. Лысаковская Е.В. Методическое обоснование и оценка развития малых и средних предприятий химического комплекса с использованием государственной поддержки: автореф. ... экон. наук. Москва, 2009.
7. Оценка кадрового потенциала отрасли / Прохоров И.В., Петровский А.Н., Богачев Ю.С., Ефимова И.В., Шкупко Ю.Н. // Научная сессия МИФИ. 2006. Т. 11. С. 12-16.

Сведения об авторах

Еремеев Дмитрий Викторович – канд. экон. наук, доц. кафедры «Финансы и кредит» ФГБОУ ВПО «Сибирский аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева», г.Красноярск. E-mail: eremeev.dmitriy@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

CONCEPTUAL MODEL OF COMPETITIVENESS RELATIONSHIP OF HIGH TECHNOLOGY ENTERPRISE AND ITS INNOVATIVE FACILITIES

Erimeev DmitriyVictorovich – Ph.D. (Economics), associate professor, Finance and Credit department, Krasnoyarsk Institute of Water Transport (Siberian State Aerospace University Branch). E-mail: eremeev.dmitriy@gmail.com.

Abstract. Significant changes in the external economic environment caused by the diverse influence of various factors, involve managers of high-tech companies in making strategic decisions aimed at obtaining significant competitive advantage through the development of their own innovative capacity. The article examined the conceptual theoretical and methodological foundations and reasonable relationship innovative capacity and competitiveness of high-tech enterprises.

Keywords: innovation, innovative development, enterprise competitiveness, innovation capacity, high technology enterprise

References

1. «News» Internet newspaper («VESTI.RU»). 2001-2013 [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.vesti.ru/doc.html?id=414734>.
2. Bagrinovsky K.A., Bendikov M.A., Khrustalov E.Yu. Mechanisms of technological development of the Russian economy. Moscow: Nauka, 2003.
3. Kolosov T.V. Ensuring sustainable enterprise by enhancing its innovation capacity. Phd dissertation. Nizhny Novgorod. 2011.
4. Kolosov T.V., Ovchinnikov P.A. The organization of business management through the development of strategic business units. *The main directions of improving the efficiency of the economy, governance and the quality of training: Sat Article IV of the International Scientific. Pract. Conf. Penza: Branch VZFEI*, 2006.
5. Russian Statistical Yearbook, 2011 [Electronic resource]. Mode of access: http://www.gks.ru/bgd/regl/b11_13/IssWWW.exe/Stg/d5/21-42.
6. Lysakovskaya E.V. Methodological study and evaluation of the development of small and medium-sized enterprises of the chemical complex with the use of government support. Abstract for the degree of candidate of economic sciences. Moscow, 2009.
7. Prokhorov I.V., Petrovskiy A.N., Bogachyov Y.S., Efimkova I.V., Shkupko Y.N. Assessment of human resources industry. *MIPI*. 2006, vol. 11, pp. 12-16.

УДК 658.153.8: 658.7

Васильева Н.Ф.

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КЛАССИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕРА ЗАКАЗА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ В ЧЁРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Аннотация. В статье на основе фактических данных одного из металлургических предприятий России об условиях снабжения производства окатышами, а также о расходах, связанных с запасами, исследуется возможность применения формулы Уилсона для оптимизации уровня материальных запасов на предприятиях чёрной металлургии. Выявлен неудовлетворительный результат использования формулы Уилсона для оптимизации запаса основных материалов, обусловленный низким соотношением различных групп затрат, связанных с запасами. Обосновано наличие ограничений в использовании формулы Уилсона на практике, вытекающих из величины соотношения затрат, связанных с запасами.

Ключевые слова: формула Уилсона, производственные запасы, оптимальный размер заказа, затраты, связанные с запасами, логистика.

В теории логистики запасов на протяжении вот уже почти 100 лет основным методом определения оптимального размера материального запаса является модель экономического размера заказа (называемая также формулой Уилсона, Харриса, Кампа и т.д.), в которой в качестве критерия оптимизации используется минимальная величина совокупных издержек, связанных с запасами.

В соответствии с данной моделью, как известно, совокупные годовые затраты, связанные с запасами,

складываются из затрат на пополнение запасов, находящихся в обратной зависимости от объёма заказа (или размера партии поставки), и затрат, связанных с хранением запасов, находящихся в прямой пропорциональной зависимости от объёма заказа:

$$GO = O \frac{D}{Q}, \quad (1)$$

где GO – годовые затраты на оформление заказов;

O – издержки на оформление одного заказа; D – число единиц хранения за год (годовая потребность в ресурсах данного вида); Q – объем одного заказа.

$$GS = (H + IP) \frac{Q}{2}, \quad (2)$$

где GS – годовые затраты на создание и содержание запасов; H – издержки хранения единицы запаса в течение года; IP – процент, взимаемый за единицу хранения за год в виде налога на имущество.

Общие годовые издержки, определяемые суммированием приведённых выше затрат, описываются зависимостью

$$GOD = O \frac{D}{Q} + (H + IP) \frac{Q}{2}, \quad (3)$$

где GOD – общие годовые расходы на создание и содержание запасов.

Очевидно, что данная функция имеет минимум при таком значении аргумента (размера заказа), при котором величины затрат, относящихся к 1-й и 2-й группе, равны между собой (т.е. при $GO = GS$) или равна нулю первая производная функции общих затрат. После проведённых преобразований и решения уравнения вытекает, что оптимальный размер заказа рассчитывается по формуле

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot O \cdot D}{(H + I \cdot P)}}. \quad (4)$$

Графическая интерпретация данных зависимостей представлена на рис. 1.

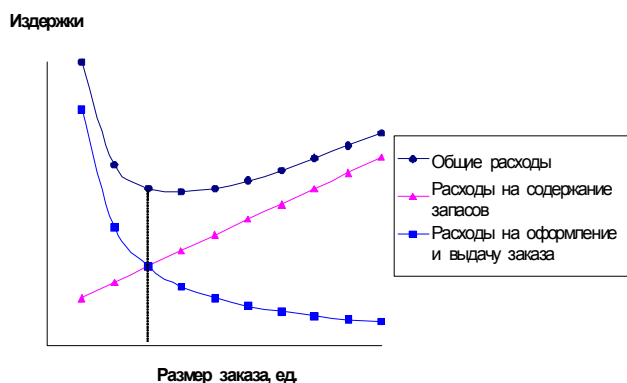


Рис. 1. Зависимость расходов на содержание запасов и оформление заказов от размера заказа

Для оценки принципиальной возможности использования классической модели на предприятиях чёрной металлургии для оптимизации размера запасов сырья и основных материалов была произведена попытка применить её при определении оптимального размера запаса окатышей, являющихся одним из видов основных материалов для производства чугуна. В пользу применения классической модели для решения поставленной задачи говорит также то, что условия поставки сырья и основных материалов во многом соответствуют основным её допущениям, а именно:

1) поставки каждого вида сырья и основных материалов (в данном случае – окатышей) производятся отдельно и потребляются постоянно и равномерно в течение года;

2) время исполнения заказа – постоянно, так как рассматриваются поставки одного поставщика;

3) интервалы поставки и время доставки – постоянные;

4) поступление осуществляется, когда уровень запаса равен нулю;

5) запасов всегда достаточно для обеспечения потребления;

6) уровень спроса на сырьевые материалы – постоянный в течение года, т.к. определяется годовым производственным планом,

и др.

Анализ данных бухгалтерского учёта о расходах на содержание управления материально-технического снабжения металлургического предприятия за 2 года, представленный в табл. 1, позволил определить один из основных параметров расчёта – долю затрат на хранение в стоимости единицы запаса, которая в среднем составила 25%, что соответствует величине данного показателя, используемой различными авторами в качестве исходных данных для расчёта оптимального размера заказа по формуле Уилсона: 0,2-0,25 [2, с. 218].

Таблица 1

Расходы, связанные с содержанием запасов на металлургическом предприятии, тыс. руб.

Наименование показателя	2010 г.	2011 г.
Расходы на содержание складского хозяйства	267608,8	324064,8
Порча и потери от естественной убыли	10358,6	6615,6
Хищения	189,2	1183,2
Итого затраты на содержание запасов	278156,6	331863,6
Средние остатки запасов на складах	1125657	1455633
Доля расходов по содержанию в стоимости запасов, %	25	24

Остальные исходные данные, представленные в табл. 2, были получены на основе анализа данных синтетического и аналитического бухгалтерского учёта о затратах подразделения отдела материально-технического снабжения, занимающегося закупками сырья и основных материалов; статистических данных о годовом количестве поставок, оформленных данным подразделением.

Анализ условий контракта на поставку окатышей, заключённого с одним из ГОКов, позволил установить годовой объём потребности в окатышах данного поставщика, равный 250000 т, а также среднюю цену, равную 34\$, что в рублёвом выражении составляет 1020 руб./т (см. табл. 2).

В составе затрат на содержание были учтены также альтернативные (капитальные) затраты, исходя из учётной ставки Центробанка 8,25%, которые в совокупности с затратами на хранение запасов (25%) составили 33,25% от стоимости единицы запаса в год.

Таблица 2

Исходные данные и расчёт оптимального размера заказа

Наименование показателя	Условное обозначение	Единица измерения	Сумма
Годовая потребность	D	т	250000
Стоимость единицы продукции	C	\$	34
«	C	руб.	1020
Издержки на оформление заказа	O	руб.	316
Доля затрат на содержание в стоимости единицы запаса	i	%	33,25
Оптимальный размер партии поставки	Q	т	683
Количество поставок в год	K	шт.	366
Транзитная норма	Hтр	т	2100

Полученная на основе расчёта с использованием формулы Уилсона (ф-ла (4)) величина оптимального размера заказа – 683 т – является неприемлемой в условиях чёрной металлургии не только потому, что существенно ниже транзитной нормы, составляющей 2100 т для окатышей, но и предполагает поставку с частотой, превышающей один раз в сутки, что соответствует 366 поставкам в год. Полученный результат обусловлен влиянием соотношения суммы затрат на выполнение заказа и величины издержек на содержание запаса. Исследуем влияние данного фактора на оптимальный размер заказа.

Предположим, что затраты на выполнение одного заказа составляют 1000 руб. при неизменной величине остальных исходных данных, которые будут иметь следующий вид (табл. 3):

При этом оптимальный размер партии поставки составит 1214 т при 206 поставках в год, то есть при увеличении затрат на оформление заказа произошёл сдвиг величины оптимума в сторону больших значений.

Таблица 3

Исходные данные и расчёт оптимального размера заказа

Наименование показателя	Условное обозначение	Единица измерения	Сумма (вариант 2)
Годовая потребность	D	т	250000
Стоимость единицы продукции	C	\$	34
«	C	руб.	1020
Затраты на оформление заказа	O	руб.	1000
Доля затрат на содержание в стоимости единицы запаса	i	%	33,25
Оптимальный размер партии поставки	Q	т	1214
Количество поставок в год	K	шт.	206
Транзитная норма	Hтр	т	2100

Рассмотрим формулу определения оптимального размера заказа, представив её в виде произведения 2-х сомножителей, одним из которых является корень квадратный из соотношения затрат на пополнение и содержание запасов, которое обозначим как коэффициент соотношения затрат K_3 :

$$Q = \sqrt{\frac{2C_0A}{IH}} = \sqrt{\frac{C_0}{IH}} \cdot \sqrt{2A} = \sqrt{K_3} \cdot \sqrt{2A}, \quad (5)$$

где $K_3 = \frac{C_0}{IH}$; C_0 – издержки на оформление одного заказа, руб.; A – годовая потребность в окатышах, т; H – стоимость единицы запаса в год, руб.; I – доля затрат на хранение в стоимости единицы запаса в год, ед.

Характер зависимости оптимального размера заказа от коэффициента соотношения затрат K_3 при разных объёмах годовой потребности в материалах, равных 100000 и 250000 т соответственно, будет иметь вид, представленный на рис. 2:

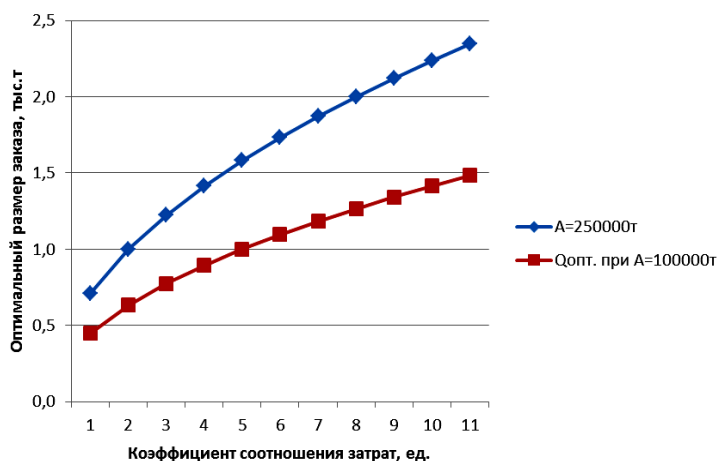


Рис. 2. Зависимость оптимального размера заказа от коэффициента соотношения затрат при разных объёмах годовой потребности

Как видим из диаграммы, при стремлении коэффициента соотношения затрат к нулю снижается и величина оптимального размера заказа, выходя из приемлемого диапазона значений, причём более высокие темпы снижения наблюдаются при более высоком объёме годовой потребности.

Таким образом, результаты применения формулы оптимального размера заказа в значительной мере определяются величиной соотношения разных видов затрат, связанных с запасами, что налагает вытекающие из этого соотношения определённые ограничения на её практическое использование.

В условиях металлургических предприятий, перерабатывающих миллионы тонн сырьевых ресурсов в год, затраты на пополнение запасов несоизмеримо малы по сравнению с

затратами на их содержание и имеют тенденцию к дальнейшему сокращению на основе активного внедрения информационных технологий в бизнес-процессы закупочной деятельности, что делает результаты применения данной модели непригодными для решения задачи оптимизации запасов сырьевых ресурсов.

Сведения об авторе

Васильева Надежда Фёдоровна – канд. экон. наук, доц. кафедры экономики и финансов ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова». E-mail: nfvasilyeva@mail.ru.

Список литературы

1. Риггс Дж. Производственные системы: планирование, анализ, контроль: пер. с англ. М.: Прогресс, 1972. 340 с.
2. Модели и методы теории логистики: учебное пособие. 2-е изд. / под ред. В.С. Лукинского. СПб.: Питер, 2008. 448 с.
3. Стерлигова А.Н. Управление запасами в цепях поставок: учебник. М.: ИНФРА-М, 2008. 430 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ABOUT THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF THE FORMULA FOR THE OPTIMAL SIZE OF ORDER TO MANAGE INVENTORY IN FERROUS METALLURGY

Vasileva Nadezhda Fedorovna – Ph.D. (Economics), associate professor, Economics and Finance department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. E-mail: nfvasilyeva@mail.ru.

Abstract. On the basis of actual data of one of the metallurgical enterprises of Russia concerning the conditions of production pellets supply, as well as the inventory related expenses, the possibility of Wilson formula application to optimize the inventory level in the ferrous metallurgy has been investigated in this article. Unsatisfactory result of the Wilson formula application to optimize base materials inventory has been revealed. It is due to the low ratio of costs various groups concerned with inventory. The existence of restrictions in the use of the Wilson formula in practice results from the costs ratio value, related to the inventory, has been proved.

Keywords: the Wilson formula, current assets, production stocks, the optimal size of the order, costs associated with inventory, profitability of assets, logistics.

References

1. Riggs J. *Production systems: planning, analysis, control*. Moscow: Progress, 1972. 340 p.
2. *Models and methods of theory of logistics*. Ed. V.S. Lukinsky. S. Petersburg: PITER, 2008. 448 p.
3. Sterligova A.N. *Inventory management in supply chains*. Moscow: INFRA-M, 2008. 430 p.

УДК 332.05:005

Пиньковецкая Ю.С.

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСКИХ СТРУКТУР В РЕГИОНАХ РОССИИ

Аннотация. Рассмотрена оценка удельных весов всех типов предпринимательских структур в общих их показателях по субъектам страны. Представлены функции плотности распределения по обороту, численности работников и количеству предпринимательских структур.

Ключевые слова: предпринимательство, малые предприятия, средние предприятия, индивидуальные предприниматели, экономико-математические модели.

Современное предпринимательство является сложной системой. Прежде всего, это совокупность большого числа самостоятельных хозяйствующих субъектов, каждый из которых сам определяет свои цели и задачи, исходя из конкретной ситуации, и является активным участником социально-экономических процессов. Учитывая, что предпринимательские структуры возникают и прекращают свою деятельность естественным образом, они должны исследоваться в качестве самоорганизующихся и саморазвивающихся экономических субъектов.

В целом, предпринимательство может рассматриваться в качестве наиболее динамично развивающегося сектора экономики. Отдельные предприниматели и предприятия, в том числе, решают задачи самореализации творческой личности, а также коллектива в целом, ведут рисковую деятельность по формированию потребительского спроса, повышению общего уровня предложения, производству новых экономи-

ческих ресурсов и благ.

В настоящей статье рассмотрены результаты исследований автора, основанных на интегративном подходе, при котором три типа предпринимательских структур – малые предприятия, средние предприятия и индивидуальные предприниматели рассматриваются в качестве единого структурно-системного комплекса, называемого в дальнейшем «предпринимательские структуры» или МСИП [1]. Актуальным представляется анализ роли и места каждого типа предпринимательских структур в рассматриваемом структурно-системном комплексе. Этот анализ проводился с использованием дескриптивного метода.

Критерии отнесения к предпринимательским структурам определены законом «О развитии малого и среднего предпринимательства в Российской Федерации» от 24 июля 2007 года №209-ФЗ [2]. Он устанавливает предельные значения численности работников (по малым предприятиям – 100, а по средним –

250 человек), ограничение в доле участия государства в уставном капитале (не более 25%), максимальные значения выручки (в настоящее время по малым предприятиям – 400 млн руб. и по средним – 1 млрд руб.), а также стоимости основных фондов.

К малому и среднему предпринимательству в соответствии с п. 1 ст. 3 указанного закона относятся также индивидуальные предприниматели: «субъекты малого и среднего предпринимательства – хозяйствующие субъекты (юридические лица и индивидуальные предприниматели), отнесенные... к малым предприятиям, в том числе к микропредприятиям, и средним предприятиям».

Индивидуальными предпринимателями в соответствии с ч. 1 Гражданского кодекса Российской Федерации являются физические лица, которые ведут предпринимательскую деятельность. Они не образуют юридического лица, но при этом с точки зрения гражданского и предпринимательского права выступают в качестве коммерческих организаций. Отметим, что в состав численности работников для этого типа предпринимательских структур включаются как непосредственно сами предприниматели, так и их наемные работники.

Учитывая сложившуюся в настоящее время существенную дифференциацию развития предпринимательских структур в регионах страны, значительный интерес представляет оценка уровня, достигнутого соответственно малыми и средними предприятиями, а также индивидуальными предпринимателями в субъектах (республиках, краях, областях) Российской Федерации.

В статье представлены итоги исследований автора, целью которых являлась разработка методов и инструментов оценки удельного веса малых, средних предприятий, индивидуальных предпринимателей в общих показателях МСИП по субъектам страны. Приведен методический подход и примеры использования экономико-математического моделирования для оценки роли трех типов предпринимательских структур.

Исследования основывались на следующих концептуальных положениях. Каждое малое предприятие, среднее предприятие, индивидуальный предприниматель, выступая в качестве самостоятельного хозяйствующего субъекта, сами определяют свои цели и задачи, исходя из конкретной ситуации, и ведут рискованную экономическую деятельность. В субъектах Российской Федерации количество предпринимательских структур очень велико. Описание показателей по каждому отдельному предприятию (предпринимателю) с последующим их агрегированием – очень сложный и трудоемкий процесс. Поэтому логичным представляется анализ деятельности совокупности предпринимательских структур, объединенных по территориальному признаку. Необходимо отметить, что предпринимательство функционирует в условиях единой институциональной политики. В субъектах Российской Федерации присутствуют предпринимательские структуры, специализирующиеся на различных видах экономической деятельности, находятся их рынки сбыта. Большинство производимой предпри-

нимательскими структурами продукции реализуется на внутрирегиональных рынках. Ниша, занимаемая предпринимательскими структурами, во всех субъектах страны достаточно однородна. Предприятия и предприниматели обеспечивают своей продукцией как население, так и другие предприятия и организации. Предлагаемый методический подход основан на рассмотрении в качестве объектов исследования совокупностей малых предприятий, средних предприятий и индивидуальных предпринимателей в регионах.

Учитывая особенности деятельности предпринимательских структур и критерии отнесения к ним, отмеченные выше, в качестве основных показателей, характеризующих предприятия и предпринимателей, предлагается рассматривать такие показатели, как оборот (объем производства) предпринимательских структур, их количество и численность работников. Отметим, что по принятой Федеральной службой государственной статистики методологии для малых и средних предприятий такой показатель, как оборот, включает стоимость отгруженных товаров собственного производства, выполненных собственными силами работ и услуг, а также выручку от продажи приобретенных на стороне товаров. Для индивидуальных предпринимателей соответствующим показателем является выручка [3].

Авторский алгоритм исследований включал следующие этапы:

- формирование информационной базы, отражающей количество малых, средних предприятий и индивидуальных предпринимателей по каждому из субъектов страны;
- формирование массивов информации, характеризующих оборот, приходящийся на каждый тип предпринимательских структур по каждому субъекту страны;
- формирование информационной базы, отражающей численность работников по совокупностям малых, средних предприятий и индивидуальных предпринимателей каждого из субъектов страны;
- определение общих объемов производства, количества МСИП и численности их работников в каждом из субъектов страны;
- расчет для каждого субъекта удельного веса каждого типа предпринимательских структур в общих объемах производства, количестве МСИП и численности их работников;
- определение параметров функций плотности распределения, аппроксимирующих полученные значения удельных весов по типам предпринимательских структур в общих показателях по МСИП в целом;
- анализ полученных по итогам вычислительного эксперимента результатов.

В процессе исследования использовались методы логического, экономико-статистического анализа, математической статистики и эконометрики. Для решения поставленных задач и обработки информации применены компьютерные программы «Statistica», «Microsoft Excel», «Mathcad».

При построении моделей в качестве исходных данных были использованы показатели сплошного

наблюдения за деятельностью малых и средних предприятий, индивидуальных предпринимателей за 2010 год, представленные на сайте Федеральной службы государственной статистики Российской Федерации по 21 республике, 9 краям и 46 областям [3].

Экономико-математические модели представляют собой функции плотности нормального распределения удельных весов исследуемых показателей деятельности МСИП по субъектам страны [4].

Функции плотности нормального распределения по данным за 2010 год, отражающие удельный вес в общем обороте МСИП, приходящийся соответственно на совокупности малых предприятий, средних предприятий и индивидуальных предпринимателей:

– по совокупности малых предприятий

$$y_1(x_1) = \frac{6,09}{0,08 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x_1 - 0,56)^2}{2 \cdot 6,4 \cdot 10^{-3}}}; \quad (1)$$

– по совокупности средних предприятий

$$y_2(x_2) = \frac{2,25}{0,05 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x_2 - 0,22)^2}{2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}}}; \quad (2)$$

– по совокупности индивидуальных предпринимателей

$$y_3(x_3) = \frac{5,83}{0,10 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x_3 - 0,22)^2}{2 \cdot 0,01}}; \quad (3)$$

где x_1 , x_2 , x_3 – соответственно удельный вес совокупности малых предприятий, средних предприятий и индивидуальных предпринимателей в общем обороте МСИП каждого субъекта Российской Федерации.

Все представленные в статье функции и таблицы разработаны автором. Проверка этих функций в соответствии с критериями (Колмогорова-Смирнова, Пирсона, Шапиро-Вилка) показала, что все они обладают высоким качеством.

Параметры полученных функций плотности нормального распределения, а именно средние значения удельных весов в общем обороте МСИП, приходящихся соответственно на совокупности малых предприятий, средних предприятий и индивидуальных предпринимателей, величины средних квадратических отклонений и интервалы изменения этого показателя, характерные для МСИП большинства субъектов страны, представлены в **табл. 1**. Интервалы, в которые попадают значения рассматриваемых показателей по большинству субъектов страны, представляют значительный интерес. Известно [5], что с вероятностью, примерно равной 0,6827, рассматриваемые показатели будут находиться в интервалах, границы которых рассчитываются следующим образом: к средним значениям показателей соответственно прибавляются и вычитаются средние квадратические отклонения. Интервалы, представленные в **табл. 1**, позволяют установить субъекты страны, в которых удельный вес оборота предпринимательских структур велик (значения показателя превышают верхнюю гра-

ницу интервала) и мал (значения показателя меньше нижней границы интервала). С точки зрения мониторинга состояния предпринимательства и планирования его дальнейшего развития эти субъекты представляют наибольший интерес.

Таблица 1

Параметры функций плотности нормального распределения, описывающих оборот МСИП, %

Параметр	Малые предприятия	Средние предприятия	Индивидуальные предприниматели
Среднее значение	56	22	22
Среднее квадратическое отклонение	8	5	10
Интервал изменения	48-64	17-27	12-32

Данные, представленные в **табл. 1**, показывают, что в большинстве субъектов страны совокупность малых предприятий обеспечивает более половины общего по МСИП объема производства товаров и услуг. Оборот по совокупностям средних предприятий и индивидуальных предпринимателей примерно одинаков и не превышает по большинству субъектов 25% от общей величины.

Поскольку средние квадратические отклонения не велики, можно сделать вывод, что в большинстве субъектов нашей страны удельный вес оборота предпринимательских структур изменяется в относительно небольших пределах.

Функции плотности нормального распределения по данным за 2010 год, отражающие удельный вес работников, занятых соответственно в малых предприятиях, средних предприятиях и у индивидуальных предпринимателей, в общей численности работников МСИП, приведены ниже:

– по совокупности малых предприятий

$$y_4(x_4) = \frac{6,56}{0,08 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x_4 - 0,54)^2}{2 \cdot 6,4 \cdot 10^{-3}}}; \quad (4)$$

– по совокупности средних предприятий

$$y_5(x_5) = \frac{1,275}{0,03 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x_5 - 0,13)^2}{2 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3}}}; \quad (5)$$

– по совокупности индивидуальных предпринимателей

$$y_6(x_6) = \frac{7,5}{0,09 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x_6 - 0,33)^2}{2 \cdot 8,1 \cdot 10^{-3}}}; \quad (6)$$

где x_4 , x_5 , x_6 – соответственно удельный вес совокупности малых предприятий, средних предприятий и индивидуальных предпринимателей в общей численности работников МСИП каждого субъекта Российской Федерации.

Параметры функций плотности нормального распределения (4)–(6), а именно средние значения удельных весов в общей численности работников МСИП, величины средних квадратических отклонений и интервалы изменения этого показателя по субъектам страны, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры функций плотности нормального распределения, описывающих численность работников МСИП, %

Параметр	Малые предприятия	Средние предприятия	Индивидуальные предприниматели
Среднее значение	54	13	33
Среднее квадратическое отклонение	8	3	9
Интервал изменения	46-62	10-16	24-42

Данные, представленные в табл. 2, показывают, что в большинстве субъектов страны численность работников совокупности малых предприятий составляет более половины общего количества занятых в МСИП. У индивидуальных предпринимателей работает около трети всех занятых в МСИП. Численность работников средних предприятий не велика и по большинству субъектов составляет от 10 до 16%. Учитывая, что объемы производства совокупностей средних предприятий и индивидуальных предпринимателей очень близки, это свидетельствует о более высокой производительности труда, характерной для средних предприятий по сравнению с индивидуальными предпринимателями.

Как и в предыдущих функциях, средние квадратические отклонения по рассматриваемому показателю не велики. То есть в большинстве субъектов нашей страны удельный вес численности работников предпринимательских структур изменяется в относительно небольших пределах.

Функции плотности нормального распределения по данным за 2010 год, отражающие удельный вес совокупностей малых предприятий, средних предприятий и индивидуальных предпринимателей в общем количестве МСИП, приведены ниже:

– по совокупности малых предприятий

$$y_7(x_7) = \frac{7,5}{0,11 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x_7 - 0,33)^2}{2 \cdot 1,21 \cdot 10^{-2}}}; \quad (7)$$

– по совокупности средних предприятий

$$y_8(x_8) = \frac{0,113}{0,002 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x_8 - 0,01)^2}{2 \cdot 0,4 \cdot 10^{-5}}}; \quad (8)$$

– по совокупности индивидуальных предпринимателей

$$y_9(x_9) = \frac{7,5}{0,11 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x_9 - 0,66)^2}{2 \cdot 1,21 \cdot 10^{-2}}}, \quad (9)$$

где x_7 , x_8 , x_9 – соответственно удельный вес совокупности малых предприятий, средних предприятий и индивидуальных предпринимателей в общем количестве МСИП каждого субъекта Российской Федерации.

Параметры функций плотности нормального распределения (7)–(9), а именно средние значения удельных весов в общем количестве МСИП, величины средних квадратических отклонений и интервалы изменения этого показателя по субъектам страны приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры функций плотности нормального распределения, описывающих количество МСИП, %

Параметр	Малые предприятия	Средние предприятия	Индивидуальные предприниматели
Среднее значение	33	1	66
Среднее квадратическое отклонение	11	0,2	11
Интервал	22-44	0,8-1,2	55-77

Данные, представленные в табл. 3, показывают, что среди предпринимательских структур в большинстве субъектов страны преобладают индивидуальные предприниматели. В среднем на них приходится около 66% от общего количества МСИП. Малые предприятия в большинстве субъектов страны составляют от 22 до 44% всех предпринимательских структур. Количество средних предприятий мало, на них приходится около одного процента всех МСИП.

В процессе исследований был проведен анализ распределения объемов производства, численности работников и количества среди трех типов предпринимательских структур, то есть малых и средних предприятий, а также индивидуальных предпринимателей. Показано наличие существенной дифференциации рассматриваемых показателей между совокупностями МСИП в субъектах страны. С использованием функций плотности нормального распределения определены средние значения рассмотренных показателей и интервалы их изменения, характерные для большинства субъектов страны. Проведенные расчеты позволяют оценить и сравнить уровень, достигнутый малым и средним предпринимательством в регионах Российской Федерации.

Список литературы

1. Пиньковецкая Ю.С. Малое и среднее предпринимательство: достигнутый уровень и инструменты анализа. Saarbrücken (Germany): LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 172 с.
2. О развитии малого и среднего предпринимательства в Российской Федерации: Федеральный закон №209-ФЗ от 24.07.07 г.
3. Федеральная служба государственной статистики: официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru> (дата обращения: 15.02.2013).
4. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с.
5. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Высш. шк., 2001. 575 с.

Сведения об авторах

Пиньковецкая Юлия Семеновна – канд. экон. наук, доц. кафедры экономического анализа и государственного управления Ульяновского государственного университета. E-mail: judy54@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ANALYSIS OF DISTRIBUTION BASIC INDICATORS OF ENTREPRENEURIAL STRUCTURES IN THE REGIONS OF RUSSIA

Pinkovetskaya Julia Semenovna – Ph.D. (Economics), associate professor, Economic Analysis and State Management department, Ulyanovsk State University. E-mail: judy54@yandex.ru.

Abstract. The evaluation of the specific weights of all kinds of entrepreneurial structures in their overall index number by country regions has been considered. Density distribution functions according to turnover, the number of employees and the amount of entrepreneurial structures have been presented.

Keywords: entrepreneurship, small enterprises, medium enterprises, individual entrepreneurs, economic-mathematical models.

References

1. Pinkovetskaya J.S. Small and medium entrepreneurship: achieved level

and instruments of analysis. Saarbrücken (Germany): LAP Lambert Academic Publishing, 2012, 172 p.

2. On the development of small and medium entrepreneurship in the Russian Federation: Federal law №209-FZ, 24.07.07.
3. Federal Agency of the state statistics: official site. [Electronic recourse]. URL: <http://www.gks.ru/>. Data: 15.02.2013.
4. Kremer N.Sh. Theory of probability and mathematical statistic. Moscow: UNITI-DANA, 2004. 573 p.
5. Ventzel E.S. Theory of probability. Moscow: High school, 2001. 575 p.

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 A4.

При наборе статьи в **Microsoft Word** рекомендуются следующие установки:

- **шрифт** – **Times New Roman**, размер – 14 пт, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- при вставке **формул** использовать встроенный редактор формул **Microsoft Equation** со стандартными установками, применяется только сквозная нумерация;
- **рисунки и фотографии**, вставленные в документ, должны быть четко выполнены, допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров (толщины линий и размеры обозначений должны обеспечивать четкость при уменьшении рисунка до рациональных размеров), в форматах *.TIF, *.JPG, с разрешением **не менее 300 dpi**, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов. Максимальный размер рисунка с подписью – 150×235 мм. В тексте статьи должны быть подрисовочные подписи в местах размещения рисунков. Например:
- **таблицы** нумеруются, если их число более одной. Заголовков необходим, когда таблица имеет самостоятельное значение, без заголовка дают таблицы вспомогательного характера.

3.3. При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц **СИ**.

4. ДОКУМЕНТЫ, ПРИЛАГАЕМЫЕ К СТАТЬЕ

4.1. 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»).