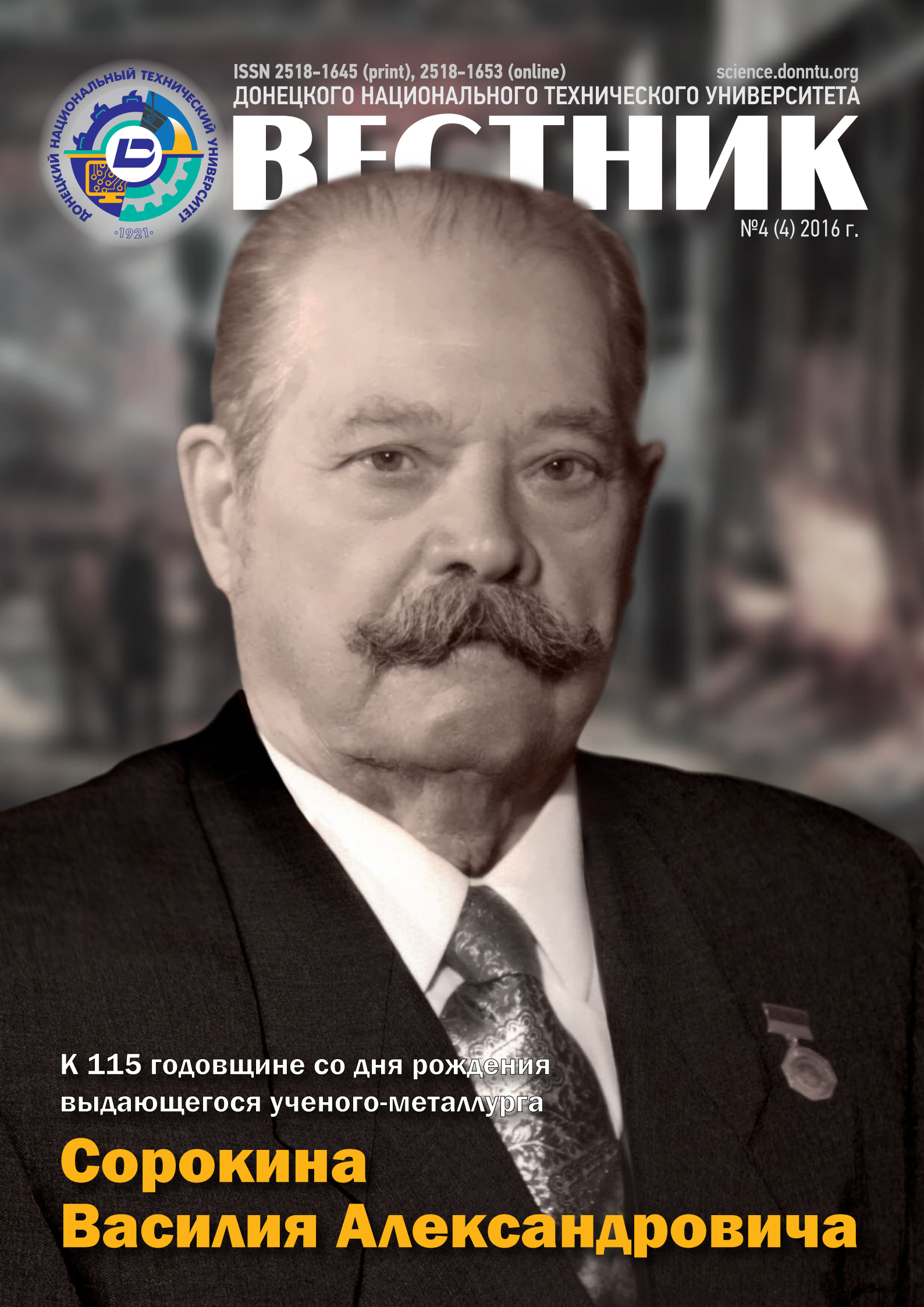
ISSN 2518-1645 (print), 2518-1653 (online)
science.donntu.org

ДОНЕЦКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ВЕСТНИК

№4 (4) 2016 г.



К 115 годовщине со дня рождения выдающегося ученого-металлурга

Сорокина Василия Александровича

Expo Coating MOSCOW

25–27 октября 2016

Москва
Крокус Экспо

14-я Международная выставка технологий, оборудования и материалов для обработки поверхности и нанесения покрытий

на металлы • сплавы • пластические массы • дерево • керамические материалы • бетон







0+

Организаторы:

primexpo ITE

+7 (812) 380 6002/00
coating@primexpo.ru

При участии:

РХТУ им. Д. И. Менделеева
Российское химическое общество им. Д. И. Менделеева
Московское химическое общество им. Д. И. Менделеева
Российское общество гальванотехников

Получите электронный билет:
expocoating-moscow.ru

Вестник ДонНТУ №4(4)'2016

международный научно-технический журнал

Учредитель и издатель: *ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)*

Главный редактор
Маренич К.Н. (д.т.н., проф.)*

Зам. главного редактора
Булгаков Ю.Ф. (д.т.н., проф.)*

Ответственный секретарь
Сотников А.Л. (к.т.н., доц.)*

Редакционный совет:
Бершадский И.А. (д.т.н., проф.)*
Бирюков А.Б. (д.т.н., проф.)*
Бутузова Л.Ф. (д.х.н., проф.)*
Высоцкий Ю.Б. (д.х.н., проф.)*
Гавриленко В.А. (д.э.н., проф.)*
Гуляев В.Г. (д.т.н., проф.)*
Гутаревич В.О. (к.т.н., доц.)*
Дедовец И.Г. (к.т.н., доц.)*
Еронько С.П. (д.т.н., проф.)*
Ковалев А.П. (д.т.н., проф.)*
Кондрахин В.П. (д.т.н., проф.)*
Кононенко А.П. (д.т.н., проф.)*
Кучер В.А. (д.э.н., проф.)*
Ларин А.М. (к.т.н., доц.)*
Морозова Л.Н. (к.т.н., доц.)*
Павлюков В.А. (к.т.н., доц.)*
Приседский В.В. (д.х.н., проф.)*
Толок А.В. (к.т.н., доц.)*
Шабаев О.Е. (д.т.н., проф.)*
Шаповалов В.В. (д.х.н., проф.)*
** - штатные сотрудники учредителя*

Адрес: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58
Телефоны: +380 (62) 304-60-82,
(66) 029-44-30
Эл. почта: vestnikdonntu@gmail.com
Интернет: vestnik.donntu.org

Вестник ДонНТУ
2016. №4(4)

ISSN 2518-1645 (print)
ISSN 2518-1653 (online)

Издается с января 2016 г.
Периодичность издания: 6 раз в год

Свидетельство
о государственной регистрации
№303 от 06.08.2015

За содержание статей и их оригинальность несут ответственность авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов. За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

Подписано к печати
по решению Ученого Совета
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»
Протокол №9 от 18.12.2015

Формат 60×84$^{1/8}$. Заказ 0916.
Тираж 100 экз. Печать:
Изд-во «Донецкая политехника», 2016

СОДЕРЖАНИЕ

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК «МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ»

ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВО

В.Л. Малинов, Л.С. Малинов
Экономнолегированные наплавочные материалы, обеспечивающие получение в структуре наплавленного металла метастабильного аустенита и реализацию эффекта самозакалки при нагружении 3
Л.А. Воропанова, Н.Т. Кисиев, З.А. Гагиева
Экстракция ионов железа и меди смесью олеиновой кислоты и триэтаноламина в керосине 10
Н.И. Захаров
Математическое моделирование процессов конвективной диффузии и энергосберегающие режимы технологии внепечной дегазации расплава стали от водорода комплексным воздействием 15
А.В. Ветчинов, Т.А. Щеголева, В.А. Гольцов
Электрохимическая водородная установка для исследования формоизменения металлов и сплавов.....23

ОБОРУДОВАНИЕ

Р.Р. Дема, Р.Н. Амиров, М.В. Харченко, А.А. Харченко, М.А. Леванцевич, Н.Н. Максимченко, А.Н. Белый
Определение воздействующих параметров на эффективность работы системы подачи технологической смазки непрерывных широкополосных станов горячей прокатки.....27
А.Б. Бирюков, П.А. Гнитиев
Система диагностики теплового состояния металла в камерных печах при его воздушном охлаждении.....32
О.И. Павлиненко, Э.П. Левченко, В.Г. Чебан
Анализ возможности использования существующих технических средств для получения стальной колотой дроби 38
В.Н. Ульяницкий, П.А. Петров
Влияние формы сечения и расположения сортового металлопроката на энергосиловые параметры резки фасонными ножами 45
В.Е. Махов, С.Е. Шалдаев
Высокоточные оптические измерительные системы формы изделий и инструмента.....50

ЮБИЛЕИ И ПЕРСОНАЛИИ

К 115 годовщине со дня рождения профессора Василия Александровича Сорокина 59
В.Н. Ульяницкий
Через призму истекших лет.....61

ИНФОРМАЦИЯ

Требования к статьям, направляемым в редакцию 64

Информация об издании

– На страницах журнала публикуются научные статьи фундаментального и прикладного характера, информация о конференциях, семинарах и выставках; освещается деятельность ведущих научно-исследовательских и проектных институтов, промышленных предприятий и коммерческих организаций, технопарков.
– Журнал оказывает информационную поддержку в продвижении на рынок конкурентоспособной наукоемкой продукции, проектов, научно-технических разработок и высоких технологий в различных областях промышленности.
– Журнал распространяется бесплатно в печатном и эл. виде посредством сети Интернет; принимает участие в научных конференциях и выставках.
– Журнал включен в «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ). Интернет: elibrary ru
– Редакция журнала принимает к публикации и осуществляет рецензирование рукописей статей по химическим, техническим и экономическим наукам и следующим группам специальностей: 02 00 – Химические науки; 05.02 – Машиностроение и машиноведение; 05 04 – Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение; 05 05 – Транспортное, горное и строительное машиностроение; 05.09 – Электротехника; 05.11 – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; 05.14 – Энергетика; 05.16 – Металлургия и материаловедение; 05.17 – Химическая технология; 08.00 – Экономические науки

VESTNIK DONNTU No.4(4)'2016

international scientific-technical journal

Founder and publisher *Donetsk National Technical University (Donetsk)*

Editor-in-chief
Marenych K.N. (Dr. Sci. (Eng), Prof.)*

Deputy Editor-in-chief
Bulgakov Y.F. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*

Executive secretary
Sotnikov A.L. (Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.)*

Editorial council:
Bershadsky I.A. (Dr. Sci. (Eng.), Prof)*
Biryukov A.B. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*
Butuzova L.F. (Dr. Sci. (Chem.), Prof.)*
Vusotsky Y.B. (Dr. Sci. (Chem.), Prof.)*
Gavrilenko V.A. (Dr. Sci. (Econ.), Prof.)*
Gulyaev V.G. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*
Gutarevich V.O. (Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof)*
Dedovets I.G. (Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.)*
Eron'ko S.P. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*
Kovalev A.P. (Dr. Sci. (Eng), Prof.)*
Kondrahin V.P. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*
Kononenko A.P. (Dr. Sci. (Eng), Prof.)*
Kucher V.A. (Dr. Sci. (Econ.), Prof.)*
Larin A M. (Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.)*
Mishchenko N.I. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*
Morozova L.N. (Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof)*
Pavlyukov V.A. (Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.)*
Prisedsky V.V. (Dr. Sci. (Chem.), Prof.)*
Tolok A.V. (Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof)*
Chaltsev M.N. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*
Shabayev O.E. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*
Shapovalov V.V. (Dr. Sci. (Chem.), Prof.)*

** - staff members of the founder*

Address: 283001, Donetsk, 58, Artema St.
Phone: +380 (62) 304-60-82,
(66) 029-44-30
E-mail: vestnikdonntu@gmail.com
Internet: vestnik.donntu.org

Vestnik DonNTU
2016. No.3(3)

Published since January, 2016
Publication frequency: 6 times a year

Certificate of State Registration
No.303 dated 06.08.2015

The content and originality
of the articles is the author's
respons bility. The editorial opinion
may not necessarily represent
the views of the authors.
The content of advertising material
is the advertiser's responsibility.

Subscribed to print
on the recommendation
of the Academic Council
Donetsk National Technical University
Protocol No.9 dated 18.12.2015

Format 60×84$^{1/8}$. Order 0916.
Circulation 100. Print:
Publishing house
"Donetsk Polytechnic", 2016

CONTENTS

SPECIAL ISSUE
"METALLURGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT"

TECHNOLOGY AND PRODUCTION

V.L. Malinov, L.S. Malinov
Sparingly alloy surfacing materials for obtaining metastable austenite in the structure of deposited metal and the implementation of self-hardening effect under load 3

L.A. Voropanova, N.T. Kisiev, Z.A. Gagieva
Extraction of iron and copper ions by a mixture of oleic acid and triethanolamine in kerosene 10

N.I. Zakharov
Mathematical modeling of convective diffusion processes and the power saving mode of ladle degassing of the molten steel from the hydrogen by complex influence 15

A.V. Vetchinov, T.A. Shchegoleva, V.A. Goltsov
Electrochemical hydrogen plant for deformation study of metals and alloys 23

EQUIPMENT

R.R. Dema, R.N. Amirov, M.V. Kharchenko, A.A. Kharchenko, M.A. Levantsevich, N.N. Maximchenko, A.N. Belyj
Determination of parameters influencing the efficiency of the supply system for technological lubrication in continuous wide hot rolling mills 27

A.B. Biryukov, P.A. Gnitiev
The system of diagnostics of the thermal state of metal in chamber furnaces with air cooling 32

O.I. Pavlinenko, E.P. Levchenko, V.G. Cheban
The analysis of possibility of using the existing technical means to obtain the steel chipped fraction 38

V.N. Ulianitsky, P.A. Petrov
The influence of the cross-section shape and the location of metal products on power parameters of cutting with shaped cutters 45

V.E. Makhov, S.E. Shaldaev
High-precision optical systems for measuring forms of products and tools 50

ANNIVERSARIES AND BIOGRAPHY

To the 115th anniversary of the birth of Professor Vasily Alexandrovich Sorokin 59

V.N. Ulianitskiy
Through the prism of the past years 61

INFORMATION

Requirements for the articles submitted to the Editorial office 64

Publication Information

– The journal publishes research papers of fundamental and applied nature, information on conferences, seminars and exhibitions. It covers the activities of the leading research and design institutes, industrial and commercial companies and technology parks.

– The journal provides information support for the marketing of competitive high-tech products, projects, scientific and technical developments and high technologies in various fields of industry.

– The journal is distributed free of charge in electronic format via the Internet. t provides informational support and participates in International scientific conferences and exhibitions.

– The editorial accepts for publication and reviews manuscripts on chemical, technical and economic sciences, and the following groups of specialties: 02.00 – Chemical Science; 05 02 – Mechanical engineering and engineering science; 05 04 – Power, Metallurgical and Chemical Engineering; 05 05 – Transport, Mining and Construction Engineering; 05 09 – Electrical Engineering; 05.11 – Instrument engineering, metrology and information-measuring instruments and systems; 05.14 – Energy; 05.16 – Metallurgy and materials science; 05.17 – Chemical Technology; 08.00 – Economics

УДК 621.741.92

В.Л. Малинов /к.т.н./, Л.С. Малинов /д.т.н./
ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет» (Мариуполь)

ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫЕ НАПЛАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ПОЛУЧЕНИЕ В СТРУКТУРЕ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА МЕТАСТАБИЛЬНОГО АУСТЕНИТА И РЕАЛИЗАЦИЮ ЭФФЕКТА САМОЗАКАЛКИ ПРИ НАГРУЖЕНИИ

Обобщены результаты исследований по созданию экономнолегированных наплавочных материалов на Fe-Cr-Mn-C и Fe-Mn-C основах широкого спектра применения, обеспечивающих получение в структуре наплавленного металла различных структурных классов метастабильного аустенита и протекание динамического деформационного мартенситного превращения.

***Ключевые слова**: мартенсит, метастабильный аустенит, эффект самозакалки, износостойкость, карбиды, карбонитриды.*

Постановка проблемы

Ресурсосбережение – важная проблема для промышленности. Одним из направлений ее решения является повышение долговечности сменнозапасных деталей оборудования и инструментов электродуговой наплавкой. Многие наплавочные материалы, применяемые для этого, зачастую содержат дорогие легирующие элементы – никель, кобальт, вольфрам и др. В связи с этим актуальна задача разработки и внедрения в производство экономнолегированных наплавочных материалов, существенно повышающих эксплуатационную стойкость деталей и инструментов и за счет этого реализующих энерго- и ресурсосбережение.

Анализ последних исследований и публикаций

В работах [1-3] развивается инновационное научно-прикладное направление по созданию ресурсосберегающих материалов и упрочняющих технологий, обеспечивающих получение многофазной метастабильной, управляемо самотрансформирующейся структуры. Химический состав подбирается так, чтобы в качестве основных использовались сравнительно недорогие легирующие элементы – углерод, марганец, хром, кремний. Дополнительно могут быть введены титан, ванадий, ниобий, азот. Должна быть получена структура, состоящая из мартенсита и/или бейнита, карбидов, кабонитридов, других твердых фаз. При этом обязательно присутствие в структуре метастабильного аустенита, претерпевающего при нагружении динамическое деформационное мартенситное превращение (ДДМП). В ряде случаев основной структурой является метастабильный аустенит при отсутствии или небольшом количестве других структурных составляющих. Количественное их соотношение и интенсивность ДДМП определяются условиями нагружения и должны регулироваться с их учетом. Метастабильная структура позволяет материалам подобно биологическим объектам приспосабливаться в процессе эксплуатации к внешним нагрузкам. За счёт различных структурных (диспергирование составляющих, изменение плотности дислокаций, двойникование) и фазовых превращений, прежде всего образования под их влиянием мартенсита. В ряде работ также рассматривается необходимость получения в структуре метастабильного аустенита для повышения их механических свойств [4-6].

Впервые идея создания сталей с метастабильным аустенитом была высказана и реализована еще в 50-х годах прошлого века И.Н. Богачевым и Р.И. Минцем [7,8] применительно к деталям, подвергавшимся кавитационному разрушению, а затем и к деталям, работающим в условиях контактно-усталостного нагружения [9]. Ими была разработана хромомарганцевая сталь 30Х10Г10. На ее основе были созданы электроды УПИ 30Х10Г10 и порошковая проволока ПП-30Х11Г12Т [10]. Наряду с очень высокими эксплуатационными свойствами, обеспечиваемыми ими, имеет место ряд недостатков. К ним относятся: технологические особенности наплавки и трудная обрабатываемость резанием наплавленного металла [11], что существенно ограничило применение ранее разработанных наплавочных материалов. На предприятиях Украины они практически не используются.

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

Цель (задачи) исследования

Целью данного исследования является создание и эффективное применение в промышленности технологичных наплавочных материалов на Fe-Cr-Mn-C и Fe-Mn-C основах, обеспечивающих получение в наплавленном металле структуры с метастабильным аустенитом. Последний должен претерпевать при нагружении в процессе испытаний или эксплуатации ДДМП (эффект самозакалки при нагружении).

Основной материал исследования

Авторами изготавливались однозамковые порошковые ленты сечением 3×10 мм и проволока диаметром 3,6 мм с оболочкой из стали 08кп, имеющей толщину 0,3 мм. Сердечник состоял из смеси порошковых компонентов. В ряде случаев изготавливали проволоку сплошного сечения. Наплавку опытных образцов для испытания свойств и определения фазового состава выполняли в 3 слоя на пластины толщиной 30 мм из стали ВСт3сп под флюсом АН-26. Наплавка порошковыми лентами проводилась на режиме: сила тока I=450-500 А, напряжение U=30-32 В, скорость наплавки V=25 м/ч, а проволоками: I=300-350 А, U=28-32 В, V=35 м/ч.

Проводили дюрометрические, металлографические исследования. Химический анализ наплавленного металла выполнялся оптико-эмиссионным искровым спектрометром «Spectromax».

Фазовый состав наплавленного металла определяли методом рентгеновского анализа с использованием дифрактометра ДРОН-4. Оценивалась износостойкость при сухом трении, абразивном и ударно-абразивном воздействии.

На основе развиваемой концепции ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет» совместно с ОАО «Азовмаш» разработаны порошковые ленты ПЛН-4 (15Х13АГ10МФС) [12].

Исследования, выполненные в работе [13], показали, что в условиях трения скольжения при относительно невысоких скоростях (0,13 м/с) и отсутствии или небольшом разогреве трущихся поверхностей интенсивное деформационное мартенситное превращение играет существенную роль в повышении износостойкости. В случае испытаний с повышенной скоростью скольжения (0,98 м/с) интенсивность мартенситного превращения при трении снижается из-за повышения температуры рабочей поверхности. В этих условиях износостойкость наплавленного металла в большей степени определяется способностью к упрочнению самого аустенита и его динамическому старению. Это в основном зависит от содержания углерода в наплавленном металле, что подтверждают данные табл. 1. Испытания износостойкости в условиях трения качения (давление 320 МПа, скорость вращения роликов 0,98 м/с, проскальзывания 0,09 м/с) показали, что большим сопротивлением изнашиванию характеризуется наплавленный металл с интенсивным деформационным мартенситным превращением.

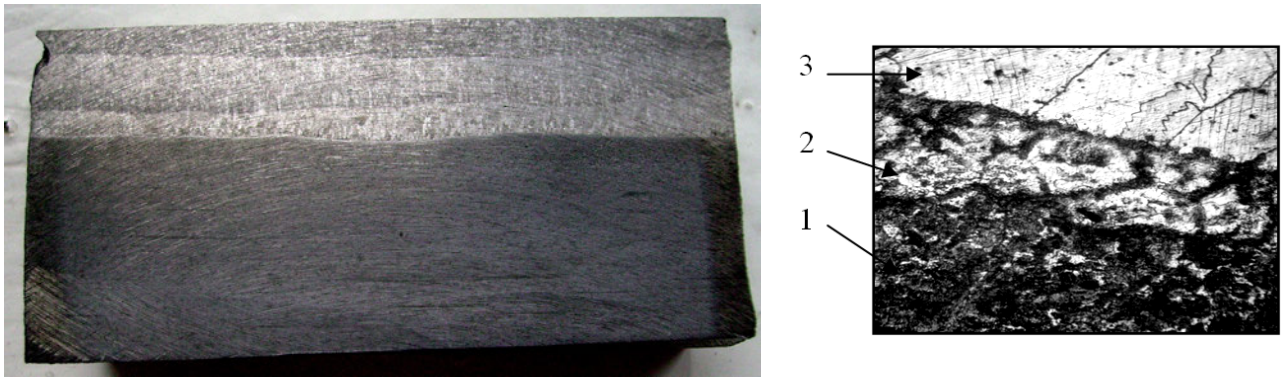
Температура нагрева наплавленного металла при термообработке (450-650 °С), проводимой для уменьшения внутренних напряжений, неоднозначно влияет на его износостойкость. При испытаниях в условиях трения скольжения (относительно небольшие скорости), а также трения качения установлено, что нагрев на 350 °С (1 ч) снижает износостойкость наплавленного металла приблизительно на 30 %, а нагрев на 650 °С – повышает ее примерно на 40 % по сравнению с закаленным состоянием. Это обусловлено тем, что в первом случае аустенит стабилизируется по отношению к деформационному мартенситному превращению, а во втором – дестабилизируется в связи с выделением карбидов и карбонитридов. В последнем случае положительную роль играют дисперсные частицы фаз выделения. В условиях трения, не приводящего к значительному разогреву контактирующих поверхностей, предварительная холодная пластическая деформация повышает износостойкость наплавленного металла за счет активизации деформационного мартенситного превращения.

В условиях трения, сопровождающегося значительным повышением температуры (более 450 °С), предварительная холодная деформация снижает износостойкость наплавленного металла. Это обусловлено переходом образовавшегося при деформации мартенсита в аустенит, что

Табл. 1. Влияние углерода в наплавленном металле типа Х13АГ10МФС на количество мартенсита деформации и относительную износостойкость [13]

Массовая доля углерода, %	Скорость скольжения 0,13 м/с		Скорость скольжения 0,98 м/с	
	Количество мартенсита деформации, %	Относительная износостойкость	Количество мартенсита деформации, %	Относительная износостойкость
0,1	28	4,2	10	3,1
0,15	19	3,8	5	4,8
0,2	12	3,3	–	5,5

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б

Рис. 1. Структура металла, наплавленного ВЕЛТЕК Н-285-С на сталь 65Г:
а – макроструктура, ×16; *б* – микроструктура, ×550: *1* – основной металл (троостит);
2 - переходный слой (аустенит с трооститной сеткой); *3* – аустенитный слой

снижает сопротивление металла пластической деформации.

Были разработаны порошковая проволока ПП-Нп 12Х12Г12СФ [14] и проволока сплошного сечения Св-14Х14Г12Ф [15], близкие по принципу легирования рассмотренной выше порошковой ленте ПЛН-4 (15Х13АГ10МФС). Эти материалы позволили в несколько раз повысить долговечность быстроизнашивающихся деталей.

Применительно к условиям наплавки крановых колес ПАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича» специалистами ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет» совместно с ООО «ТМ. ВЕЛТЕК» разработана новая порошковая проволока ВЕЛТЕК Н-285-С [16]. При наплавке новой порошковой проволокой используются флюсы АН-26 или «REKORD SK EN-760». При этом обеспечивается хорошее формирование и соединение слоев наплавленного металла между собой, а также с основным металлом (рис. 1а). Отсутствуют непровар, шлаковые включения и трещины. Отделимость шлаковой корки хорошая. В случае изготовления деталей из нелегированных сталей, содержащих 0,35-0,45 %С, наплавка может проводится без предварительного подогрева. Слои наплавленного металла имеют аустенитную структуру с дисперсными карбидами, располагающимися внутри зерен. Вблизи линии сплавления в основном металле (сталь 65Г) обнаруживается обезуглероженная зона (рис. 1б), что обусловлено диффузией углерода в наплавленный металл, имеющий его значительно меньшее количество, чем сталь, на которую осуществлялась наплавка.

Измерения твердости по сечению показали, что она вблизи поверхности наплавленного металла составляет НВ 217-220, в средней части НВ 230-240, а у переходной зоны возрастает до НВ 280-300.

По данным лабораторных испытаний износостойкость металла, наплавленного разработанной порошковой проволокой, при трении скольжения по схеме колодка-ролик и абразивном воздействии значительно превышает таковую при использовании проволок ПП-Нп-18Х1Г1М, Нп-12Х13 и Св-06Х18Н9Т (табл. 2) [17].

Длительные промышленные испытания крановых колёс, наплавленных разработанной порошковой проволокой, обеспечивающей эффект самозакалки при эксплуатации, подтвердили результаты лабораторных исследований и показали увеличение долговечности этих деталей более, чем в 5 раз, по сравнению с колёсами, восстановленными широко применяемой в промышленности проволокой ПП-Нп-18Х1Г1М. Определение твёрдости рабочей поверхности колёс, наплавленных новой порошковой проволокой, показало, что она в процессе эксплуатации возросла с 217-220 до 450-470 НВ. Это свидетельствует о реализации эффекта самозакалки

Табл. 2. Относительная износостойкость наплавленного металла,
полученного при использовании проволок различного химического состава [16]

№ п.п.	Наплавочный материал	Режим термообработки	Относительная износостойкость	
			абразивная	сухое трение
1	ПП-Нп-18Х1Г1М	Наплавка + отжиг 550 ˚С (1 ч)	1	1
2	Св-12Х13	Наплавка + отжиг 550 ˚С (1 ч)	1,2	1,3
3	Св-06Х18Н9Т	Наплавка + отжиг 550 ˚С (1 ч)	0,6	0,7
4	ВЕЛТЕК Н-285-С	Наплавка + отжиг 600 ˚С (1 ч)	2,3	3,2

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 3. Свойства металла, наплавленного проволоками ПП-35ЖН (10Х13Г12АФСЮР) и Св-08Х21Н10Г6

Тип наплавленного металла	Износ при 600 °С, давлении 15 МПа (время испытания 1 ч), мг	Термостойкость (количество циклов «нагрев-охлаждение» до появления трещин)	Твердость HRB при температурах 20 и 600 °С	
			20	600
10Х13Г12АФСЮ	4,2-7,4	930-1080	100-110	80-89
08Х21Н10Г6	23,9-29,7	440-620	82-88	66-73

в наплавленном металле в процессе работы колес, что и обеспечивает их повышенную долговечность. При этом важно подчеркнуть, что не происходит повышенный износ рельсов, которого опасаются эксплуатационники при увеличении износостойкости крановых колёс. Проведение механической обработки восстановленных новой порошковой проволокой крановых колёс с использованием инструмента, оснащённого твёрдыми сплавами, не вызывает каких-либо технических трудностей. Однако наплавленный металл обрабатывается труднее, чем при использовании проволоки ПП-Нп-18Х1Г1М. По обрабатываемости он близок к таковому, наплавленному Св-06Х18Н9Т. Разработанный наплавочный материал может иметь широкий спектр применения. Его следует использовать не только для восстановления крановых колёс, но и колёс железнодорожного подвижного состава предприятий, вагонеток, различного рода роликов, цапф сталеразливочных ковшей, быстроизнашивающихся деталей, работающих в слабоагрессивных средах, например плунжеров гидропрессов, клапанов запорной арматуры.

Экономическая эффективность в данном случае определяется снижением затрат (материальных, энергетических, трудовых, простоев оборудования), которые значительно превышают стоимость примененной проволоки.

Использование разработанной проволоки обеспечивает получение структуры метастабильного сильно упрочняющегося при наклёпе аустенита. В нём после отжига при 600 °С, применяемого для снятия внутренних напряжений, обнаруживается множество дисперсных карбидов. Результатом этого является его обеднение углеродом и легирующими элементами, вследствие чего интенсифицируется деформационное мартенситное превращение, что и приводит к существенному повышению износостойкости. Это подтверждают данные рентгеновского анализа, согласно которым, количество мартенсита деформации на изнашиваемой поверхности после отжига наплавленного металла в 1,5 раза больше, чем без него, и составляет 30-35 %.

Важно подчеркнуть, что при этом не происходит повышенного износа рельсов, которого обычно опасаются при наплавке крановых колес износостойкими материалами. Такой результат обусловлен образованием на поверхности трения окисной пленки, снижающей коэффициент трения. Разработанная порошковая проволока имеет большой спектр использования и может быть рекомендована для повышения долговечности различных деталей: опорных роликов, шкивов, цапф сталеразливочных ковшей, деталей, подвергающихся кавитационному и коррозионному воздействию среды, износу при сухом трении, в том числе, в условиях температур (650-750 °С). Новая порошковая проволока внедрена в производство и позволила получить значительный ресурсосберегающий эффект.

Применение малоуглеродистого хромомарганцевого наплавочного материала целесообразно и для некоторых деталей, работающих при температурах 600-700 °С, что установлено при использовании порошковой проволоки ПП-35ЖН (10Х13Г12АФСЮР) [17].

В табл. 2 приведены сравнительные данные износо- и термостойкости, а также твердости при 20 и 600 °С для металла, наплавленного ПП-35ЖН и Св-08Х21Н10Г6. Полученные результаты свидетельствуют о том, что последний значительно уступает безникелевому. Анализ стойкости валков пилигримовых станов в условиях ПАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича», длительное время наплавлявшихся проволокой ПП-35ЖН, показал, что их долговечность возросла в 1,4-1,65 раза по сравнению с валками, наплавленными проволокой Св-08Х21Н10Г6 [17].

Можно полагать, что применение хромомарганцевых наплавочных материалов эффективно для повышения долговечности и других инструментов горячего деформирования, работающих в условиях, аналогичных таковым для валков пилигримовых станов.

Для восстановления деталей, работающих в условиях сухого трения и отсутствия заметного влияния коррозионной среды, разработана порошковая лента ПЛН-6 (20Г14АФ) [18]. Износостойкость наплавленного ею металла находится примерно на том же уровне, что и у металла, наплавленного более дорогой лентой ПЛН-4

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

(15Х13АГ10МФС). Необходимо отметить, что наряду с высокой износостойкостью, наплавленный металл марки 20Г14АФ, обеспечивает низкий износ контртела, изготовленного из рельсовой стали, что очень важно в условиях эксплуатации крановых колес. Порошковая лента ПЛН-6 применялась в ОАО «Азовмаш» для наплавки ходовых колес мостовых кранов вместо проволоки Св-30ХГСА и показала высокую эффективность.

Представляет большой интерес группа новых малоуглеродистых (0,12-0,18 %С) наплавочных материалов на хромомарганцевой основе, создающих в наплавленном металле бейнитную структуру с небольшим количеством метастабильного аустенита. Такой наплавленный металл при экономном легировании (суммарное содержание хрома и марганца не превышает 4 %) имеет более высокую износостойкость, чем получаемый при наплавке широко применяемой порошковой проволокой ПП-Нп 18Х1Г1М, содержащей дорогой молибден.

Перспективна разработка экономнолегированных технологичных наплавочных материалов, обеспечивающих получение в наплавленном металле структуры малоуглеродистого марганцевого (7-8 % Mn) мартенсита (эффект самозакалки при охлаждении). Они могут быть дополнительно легированы Cr (3-4 %) и небольшим количествам Ti, Nb, V для получения мелкозернистой структуры и повышения износостойкости за счет образования карбидов высокой твердости [19]. Особенностью малоуглеродистых марганцевых наплавочных материалов является то, что после проведения отпуска при 600-650 °С, обычно применяемого для снятия внутренних напряжений, в наплавленном металле образуется метастабильный аустенит, что является следствием перераспределения углерода и марганца между α- и γ-фазами, и обогащения последней этими элементами. Важно подчеркнуть, что, несмотря на снижение твердости наплавленного металла после отпуска, абразивная износостойкость возрастает. Это является следствием реализации ДДМП в процессе изнашивания. Рассматриваемые материалы являются примером того, как благодаря определённому подбору химического состава, традиционно проводимая для снятия внутренних напряжений термообработка, не снижает, как это обычно бывает, а, напротив, повышает износостойкость наплавленного металла.

Новыми являются малоуглеродистые хромомарганцевые наплавочные материалы, создающие в наплавленном металле мартенситно-аустенитную структуру. По разгаро-, коррозионной и износостойкости он не уступает таковому, при использовании хромоникелевых аналогов. Получение в наплавленном металле метастабильного аустенита наряду с мартенситом повышает сопротивление образованию трещин при наплавке, а также износостойкость [20].

Выводы

1. На основании большого количества экспериментальных данных и результатов эксплуатационной проверки установлена возможность и перспективность создания технологичных Fe-Cr-Mn-C и Fe-Mn-C наплавочных материалов различных структурных классов широкого спектра применения.

2. Показана необходимость получения в структуре наплавленного металла метастабильного аустенита (в ряде случаев наряду с бейнитом и мартенситом), армированного упрочняющими фазами. Это позволяет реализовать эффект самозакалки при нагружении за счет протекания ДДМП и использовать внутренний ресурс самого материала. При этом в зависимости от условий нагружения необходимо регулировать количество аустенита и его стабильность.

3. Широкое применение в промышленности разработанных наплавочных материалов, позволяющих получить в экономнолегированном наплавленном металле многофазную структуру с метастабильным аустенитом, даст большой ресурсосберегающий эффект.

Список литературы

1. Малинов Л.С., Малинов В.Л. Ресурсосберегающие экономнолегированные сплавы и упрочняющие технологи, обеспечивающие эффект самозакалки. – Мариуполь: Рената, 2009. – 568 с.
2. Малинов Л.С., Малинов В Л. Основные положения концепции создания экономнолегированных сплавов и упрочняющих технологий, в которых реализуется принцип получения многофазной, управляемо самотрансформирующейся структуры / Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра: матеріали XII Всеукр. наук.-практ. конф., 15 квітня 2014 р., Київ. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – С. 626-638.
3. Малинов Л.С., Малинов В Л. Износостойкие марганцовистые стали с метастабильным аустенитом / Металлургические процессы и оборудование. – 2014. – №2. – С. 19-25.
4. Vasilakos A.N., Ohleri J., Katerina G. Lov-alloy TRIP-steels: A correlation mechanical properties and the retained austenite stability / Steels. – 2002. – No.6-7. – P. 249-252.

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

5. Slreicher A.M., Speer J.G., Matlock D.K. Forming response of retained austenite in a C-Si-Mn high strength TRIP sheet steels / Steels. – 2002. – No.6-7. – P. 287-293.
6. Microstructure and wear property of Fe-Mn-Cr-Mo-V alloy cladding by submerged arc welding / Lu Shan-Ping, Know Oh-Yang, Kim Tae-Bum, Kim Kwon-Hu // J. Mater. Process. Technol. – 2004. – No.2. – P. 191-196.
7. Богачев И.Н., Минц Р.И. Кавитационное разрушение железоуглеродистых сплавов. – М.: Свердловск: ГНТИ машиностроительной лит-ры, 1959. – 110 с.
8. Богачев И.Н., Минц Р.И. Повышение кавитационно-эрозионной стойкости деталей машин. – М.: Машиностроение, 1964. – 142 с.
9. Богачев И.Н. Кавитационное разрушение и кавитационностойкие сплавы. – М.: Металлургия, 1972. – 189 с.
10. Разиков М.И., Ильин В.П. Сварка и наплавка кавитационной стали марки 30Х10Г10. – М.: НИИМАШ, 1964. – 35 с.
11. Опыт совместных работ ОАО «Запорожсталь» и ОП «Реммаш» в разработке и внедрении новых наплавочных материалов / В.В. Тарасенко [и др.] // Сб. работ 2-ой науч.-практ. конф. «Модернизация и переоснащение предприятий. Эффективные технологии ремонта и восстановления деталей». Межд. пром. форум «УкрИндустрия-2006». 11 октября 2006 г., Днепропетровск. – Днепропетровск: Экспо-центр «Метеор». – С. 39-43.
12. А.с. 545436 СССР, МПК В 23К35/368. Порошковая проволока, содержащая стальную оболочку и порошкообразную шихту / Л.С. Малинов, В.И. Копоп, К.Н. Соколов и др. – №2161880/27; заявл. 11.08.75; опубл. 05.02.77, Бюл. №5.
13. Малинов Л.С., Коноп В.И., Панин В.Д. Износостойкость дисперсионно-твердеющих сталей с нестабильным аустенитом / Прогрессивные методы сварки в тяжелом машиностроении и наплавка в черной металлургии: Тезисы докладов II Всесоюзной науч.-техн. конф. – 1977. – С. 22-24.
14. Малинов Л.С. Разработка экономнолегированных высокопрочных сталей и способов упрочнения с использованием принципа регулирования мартенситных превращений / Леонид Соломонович Малинов: дис. … докт. техн. наук: 05.16.01, Екатеринбург. – 1992. – 381 с.
15. Патент 23408А Україна, МПК С22С 38/38 (2006.01). Склад дроту для зносостійкої наплавки /Л.С. Малінов, В.М. Поліщук, Д.О. Деркач та ін. – №960727955; заявл. 12.07.96; опубл. 15.06.2001, Бюл. №5.
16. Новая порошковая проволока, обеспечивающая эффект деформационного упрочнения наплавленного метала при эксплуатации / Л.С. Малинов [и др.] // Автоматическая сварка. – 2009. – №5. – С. 46-48
17. Повышение работоспособности валков пилигримовых станов наплавкой новой порошковой проволокой ПП-35ЖН / А.В. Ковальчук [и др.] // Сварочное производство. – 1984. – №7. – С. 12-13.
18. Новый наплавочный материал системы C-Fe-Mn-V для повышения долговечности ходовых колес мостовых кранов / Л.С. Малинов [и др.] // Сварочное производство. – 1988. – №9. – С. 18-20.
19. Малинов В.Л. Влияние марганца на структуру и износостойкость наплавленного металла типа низкоуглеродистой стали / Автоматическая сварка. – 2011. – №8. – С. 15-19.
20. Малинов В.Л., Малинов Л.С. Структура и износостойкость хромомарганцевого наплавленного металла / Автоматическая сварка. – 2012. – №7. – С. 13-18.

V.L. Malinov /Cand. Sci. (Eng.)/, L.S. Malinov /Dr. Sci. (Eng.)/
Pryazovskyi State Technical University (Mariupol)

SPARINGLY ALLOY SURFACING MATERIALS FOR OBTAINING METASTABLE AUSTENITE IN THE STRUCTURE OF DEPOSITED METAL AND THE IMPLEMENTATION OF SELF-HARDENING EFFECT UNDER LOAD

Background. *Resource conservation is an important issue for the industry. One of the ways to its solution is to increase the service life of replaceable spare parts of tools and equipment by electric-arc surfacing. Many applied surfacing materials contain expensive alloying elements – nickel, cobalt, tungsten, etc. In this regard, actual is the task of development and introduction into production of sparingly alloy surfacing materials that significantly increase the service durability of parts and tools and ensure resource conservation.*

Materials and/or methods. *Flux-cored strips cross-section 3×10 mm and a flux-cored wire 3.6 mm diameter with a shell of 08KP steel thickness 0.3 mm were made. The core consisted of a mixture of*

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

powder components. Surfacing of samples for properties testing and determining the phase composition was performed in 3 layers with the use of flux AN-26 on steel St3sp plates 30 mm thickness. Surfacing was performed in the mode: for flux-cored strips – current I=450-500 A, voltage U=30-32 V, welding speed V=25 m/h; for flux-cored wires – I=300-350 A, U=28-32 V, V=35 m/h.

Results. *Based on a large number of experimental data and results of operational checks, established the possibility and prospects of creating technological Fe-Cr-Mn-C and Fe-Mn-C surfacing materials of various structural classes in a wide range of applications, which provide obtaining the metastable austenite in the structure of the deposited metal and dynamic deformation martensite transformation (DDMT).*

Conclusion*. Shown the necessity of obtaining in the structure of the deposited metal of metastable austenite (in some cases along with bainite and martensite) reinforced with the reinforcing phases. This provides the implementation of the self-hardening effect under load due to DDMT and the use of the internal resource of the material. The amount of austenite and its stability must be adjusted depending on the loading conditions.*

Keywords: *martensite, metastable austenite, self-hardening effect, wear resistance, carbides, carbon nitrides.*

Статья поступила 28.09.2014 г.
© В.Л. Малинов, Л.С. Малинов, 2016
Рецензент д.т.н., проф. С.М. Сафьянц

ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

г. Алчевск 13-14 октября 2016 г.

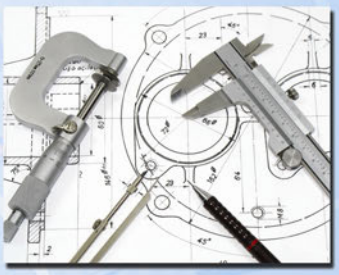
Международная научно-техническая конференция, посвященная 50-летию кафедры «Машины металлургического комплекса» ДонГТУ

Основные направления (секции):

- Оборудование металлургического комплекса;
- Технологии машиностроения;
- Горное оборудование;
- Охрана труда и экология в машиностроении;
- Гидравлические машины и оборудование;
- Обработка металлов давлением.

Организационный комитет:
Тел.: +380 (95) 614-90-19;
+380 (6442) 2-89-48 (2208)
Эл. почта: mmkipm@mail.ru www.dstu.education






ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

УДК 669.273

Л.А. Воропанова /д.т.н./
ФГБОУ ВПО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)» (Владикавказ)
Н.Т. Кисиев, З.А. Гагиева /к.т.н./
ОАО «Горно-металлургический комбинат «Норильский никель» (Норильск)

ЭКСТРАКЦИЯ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА И МЕДИ СМЕСЬЮ ОЛЕИНОВОЙ КИСЛОТЫ И ТРИЭТАНОЛАМИНА В КЕРОСИНЕ

Определены условия селективного и совместного извлечения ионов меди и железа из водного раствора экстракцией смесью олеиновой кислоты и триэтаноламина в керосине. Разработана принципиальная технологическая схема процесса экстракционного извлечения ионов меди (II) и железа (III) из водных растворов их солей.

Ключевые слова: *экстракция, олеиновая кислота, триэтаноламин, керосин, водный раствор, железо, медь.*

Постановка проблемы

Растворы, полученные при выщелачивании бедного сырья, растворы кучного и подземного выщелачивания, сточные воды, шахтные и рудничные воды содержат наряду с цветными металлами соли железа и меди. Селективное извлечение ионов железа и меди из таких растворов осаждением затруднено. Ионы Fe(II) осаждаются гидролитически совместно с основными ионами цветных металлов. Ионы Cu(II) и Fe(III) осаждаются в более кислой области, но вместе с ними также осаждаются ионы цветных металлов и органические примеси, ионы Fe(III) являются коагулянтами. Примеси железа и меди оказывают крайне негативное влияние на выход по току при электролизе многих цветных металлов. Кроме того, железо и медь содержатся в качестве примесей в производственных растворах солей других цветных металлов. Поэтому совместное и селективное извлечение ионов железа и меди является актуальной научно-технической проблемой.

Анализ последних исследований и публикаций

Селективное и совместное извлечение ионов тяжёлых металлов из растворов сложного состава возможно в процессах экстракции при использовании недорогих и эффективных экстрагентов [1-3].

В работах [4,5] исследовано извлечение ионов железа и меди из индивидуальных водных растворов их солей с использованием в качестве экстрагента смеси олеиновой кислоты и триэтаноламина в керосине в объёмном соотношении 6:3:41, соответственно. Выбор соотношения олеиновой кислоты и триэтаноламина 2:1 связан с образованием молекулы поверхностно-активного вещества $C_{17}H_{33}COOH\cdot(CH_2CH_2OH)_3N$. Такое соотношение олеиновой кислоты и триэтаноламина и концентрации их смеси в экстрагенте (18 % об) имеет место в технологической смазке марки СП-3 (ГОСТ 5702-75), содержащей, % масс: олеиновую кислоту 10-12; триэтаноламин 4,5-6; машинное масло (инертный разбавитель) – остальное. Смазку такого состава обычно применяют для приготовления водно-масляных эмульсий, используемых в качестве смазочно-охлаждающих жидкостей в прокатных, кузнечнопрессовых и других производствах.

Использование смазки СП-3 в качестве экстрагента связано с возможностью ионов металлов, как комплексообразователей, осуществлять связь с органическими лигандами через атом кислорода карбоксильных групп олеиновой кислоты и азота триэтаноламина. Установлено, что большую склонность к азоту имеют ионы Cu(II), вероятно, эта связь энергетически выгоднее связи с кислородом. Максимальным сродством к экстрагенту обладают ионы Fe(III), устойчивость комплексов которых увеличивается за счёт координационного взаимодействия с азотом. Это обусловлено тем, что азотсодержащие полиядерные лиганды обладают способностью связывать поливалентные легкогидрализующиеся катионы в прочные комплексы, что подтверждает их высокую комплексообразующую способность и склонность к образованию сложных трёхмерных каркасов. В большом избытке ионы железа выступают в качестве сшивающего агента для воднорастворимого триэтаноламина, что приводит к созданию структур коагуляционно-

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

экстракционного взаимодействия. Результаты экстракции ионов металлов из водных растворов смеси двух, трёх и четырёх солей свидетельствуют о том, что различие в экстрагируемости ионов металлов можно использовать для группового и селективного их извлечения при совместном присутствии, а также для очистки растворов основного компонента от примесей.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является определение условий селективного и совместного извлечения ионов железа и меди из растворов смеси их солей экстракцией с использованием в качестве экстрагента смеси олеиновой кислоты и триэтаноламина в керосине в объёмном соотношении 12:6:82 соответственно.

Основной материал исследования

Для приготовления растворов использовали соли $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ и $FeCl_3 \cdot 6H_2O$. Концентрация ионов металлов в исходном растворе C_0 составила, г/дм^3: 1,09-1,24 Cu(II) и 0,67-0,81 Fe(III). Температура исходного раствора 22 °С, величина pH 2,2-2,4.

Экстракцию осуществляли при перемешивании и регулировании постоянной величины pH 30-50 мин., в качестве нейтрализаторов использовали растворы NaOH и H_2SO_4. Нагрев осуществляли до 40-45 °С. Исследованиями установлено, что при комнатной температуре экстракция осуществляется менее эффективно.

Результаты экстракции оценивали остаточной концентрацией C, г/дм^3, ионов металлов в рафинате, коэффициентом распределения $D = C_{орг}/C_{вод}$, извлечением металлов в органическую фазу E, % масс от исходного, коэффициентом разделения $\beta = D_{Fe}/D_{Cu}$ в зависимости от величины pH, соотношения объёмов водной B и органической O фаз B:O. Отмечали также окраску равновесных фаз – рафината и экстракта.

В табл. 1 и на рис. 1 даны результаты экстракции в зависимости от pH раствора. Концентрация ионов металлов в исходном растворе, г/дм^3: 1,24 Cu(II) и 0,67 Fe(III). Соотношение O:B=1:3. Время перемешивания 30 мин.

В исследованном интервале pH из раствора смеси солей Cu(II) и Fe(III) селективное извлечение ионов Fe(III) возможно в интервале $3 < pH \leq 5$, совместное извлечение ионов Cu(II) и Fe(III) – в интервале $5{,}5 < pH \leq 7{,}5$.

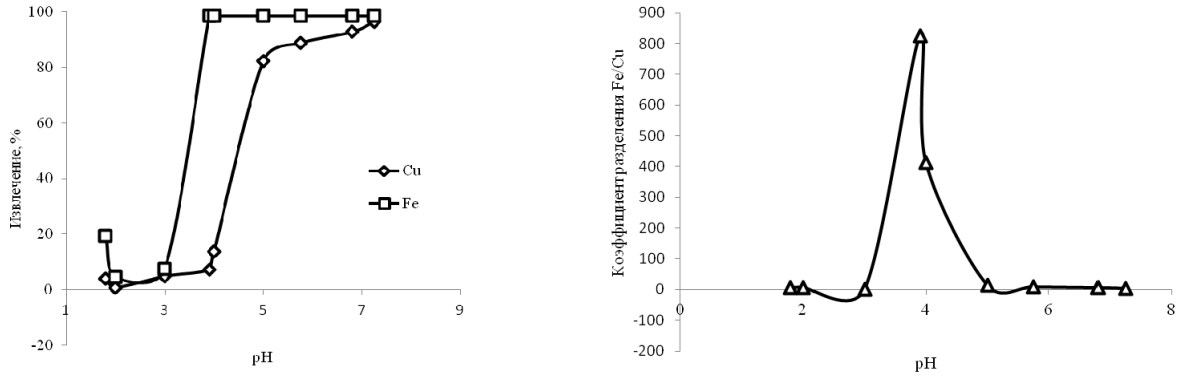
В табл. 2 и на рис. 2а даны результаты экстракции в зависимости от объёмного соотношения B:O в интервале pH=3-4 из раствора смеси солей Cu(II) и Fe(III).

Концентрация ионов металлов в исходном

Табл. 1. Зависимость результатов экстракции ионов Cu(II) и Fe(III) смесью олеиновой кислоты и триэтаноламина в керосине от величины pH раствора

№ п.п.	pH	Концентрация, г/дм^3		D		E, % масс		β	Цвет фаз	
		Cu	Fe	Cu	Fe	Cu	Fe		органической	водной
1	1,8	1,19	0,54	0,13	0,72	4,03	19,4	6	коричневая	мутная голубоватая
2	2	1,23	0,64	0,02	0,14	0,81	4,48	6	мутная бежевая	светло-голубая
3	2,8-3,3	1,18	0,62	0,15	0,24	4,84	7,46	2	мутная бежевая	светло-зеленая
4	3,8-4,1	1,15	0,01	0,24	198	7,26	98,51	843	ярко-коричневая	мутная голубая
5	4	1,07	0,01	0,48	198	13,71	98,51	415	ярко-коричневая	зеленоватая
6	4,8-5,2	0,22	0,01	13,91	198	82,26	98,51	14	коричнево-зеленая	синяя
7	5,5-6	0,14	0,01	23,57	198	88,71	98,51	8	две фазы: верх – зеленая, низ – зелено-коричневая	светло-голубая
8	6,8	0,09	0,01	38,33	198	92,74	98,51	5	две фазы: верх – зеленая, низ – светло-зеленая	голубовато-синеватая
9	7-7,5	0,05	0,01	79,67	198	96,37	98,51	3	две фазы: верх – зеленая, низ – зелено-коричневая	голубоватая

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б

Рис. 1. Зависимость извлечения ионов Cu(II) и Fe(III) смесью олеиновой кислоты и триэтаноламина в керосине при объёмном соотношении О:В=1:3 (а) и коэффициента разделения $\beta=D_{Fe}/D_{Cu}$ (б) от величины pH раствора:

растворе составила, г/дм^3: 1,16 Cu(II) и 0, 69 Fe(III) для опытов 1-5 и 1,20 Cu(II) и 0,81 Fe(III) для опытов 6-11. Время перемешивания 50 мин., в опытах 6-11 в водной фазе выпадает осадок.

Селективное извлечение ионов Fe(III) возможно при соотношении В:О≤7, при В:О≥8 в водной фазе выпадает осадок. В последнем случае извлечение из водной фазы ионов металлов рассчитывали совместно в органическую фазу и осадок.

В табл. 3 и на рис. 2б даны результаты экстракции в зависимости от объёмного соотношения В:О при pH=7 из раствора смеси солей Cu(II) и Fe(III).

Концентрация ионов металлов в исходном растворе составила, г/дм^3: 1,09 Cu(II) и 0,81 Fe(III). Время перемешивания 50 мин., в опытах 5-7 в водной фазе выпадает осадок.

Совместное извлечение ионов Cu(II) и Fe(III) возможно при соотношении 1<В:О≤4. В опытах 5-7 не удалось получить pH=7, т.к. в опыте 5 при pH>5, в опыте 6 при pH>4,8 и в опыте 7 при pH>4,2 в водной фазе выпадали осадки. Извлечение из водной фазы ионов металлов рассчитывали совместно в органическую фазу и осадок.

Экспериментально установлено, что реэкс-

Табл. 2. Зависимость результатов экстракции ионов Cu(II) и Fe(III) смесью олеиновой кислоты и триэтаноламина в керосине от объёмного соотношения В:О при pH=3-4

№ п.п.	В:О	Концентрация, г/дм^3		D		E, % масс		β	Цвет фаз	
		Cu	Fe	Cu	Fe	Cu	Fe		органической	водной
1	3	1,15	0,01	0,03	204	0,86	98,55	7820	ярко-коричневая	мутная голубая
2	4	1,09	0,11	0,26	21,09	6,03	84,06	82	ярко-коричневая	прозрачная голубая
3	5	0,82	0,11	2,07	26,36	29,31	84,06	13	ярко-коричневая	прозрачная голубая
4	6	1,09	0,10	0,39	35,40	6,03	85,51	92	ярко-коричневая	прозрачная голубая
5	7	1,09	0,20	0,45	17,15	6,03	71,01	38	ярко-коричневая	прозрачная голубая
6	8	1,11	0,27	–	–	7,50	66,67	–	бежево-оранжевая	мутная зеленоватая
7	9	1,09	0,35	–	–	9,17	56,79	–	бежево-желтая	мутная желтая
8	10	1,14	0,60	–	–	5,00	25,93	–	бежево-оранжевая	мутная зеленая
9	11	1,09	0,71	–	–	9,17	12,35	–	бежево-коричневая	прозрачная зеленоватая
10	13	1,12	0,72	–	–	6,67	11,11	–	бежево-коричневая	прозрачная зеленоватая
11	15	1,20	0,79	–	–	0	2,47	–	бежевая	мутная зеленоватая

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

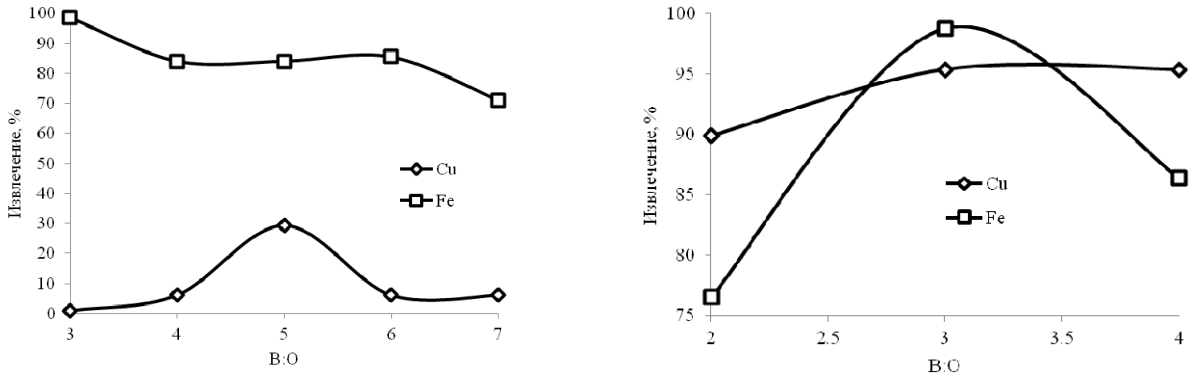


Рис. 2. Зависимость извлечения ионов Cu(II) и Fe(III) смесью олеиновой кислоты и триэтаноламина в керосине от объёмного соотношения B:O при pH=3-4 (*а*) и pH=7 (*б*)

Табл. 3. Зависимость результатов экстракции ионов Cu(II) и Fe(III) смесью олеиновой кислоты и триэтаноламина в керосине от соотношения объёмов B:O при pH=7

№ п.п.	B:O	pH	Концентрация, г/дм^3		D		E, % масс		β	Цвет фаз	
			Cu	Fe	Cu	Fe	Cu	Fe		органической	водной
1	1	7,2	0,22	0,42	3,95	0,93	79,78	48,15	0,24	темно-зеленая	белая
2	2	7	0,11	0,19	17,78	6,53	89,89	76,54	0,37	темно-зеленая	мутная голубая
3	3	7	0,05	0,01	62,28	240	95,40	98,77	3,85	темно-зеленая	прозрачная голубая
4	4	6,8	0,05	0,11	83,04	25,45	95,40	86,42	0,31	темно-зеленая	прозрачная голубая
5	5	5	0,33	0,11	–	–	69,67	86,42	–	светло-зеленая	прозрачная голубая
6	6	4,8	0,65	0,11	–	–	40,26	86,42	–	зелено-коричневая	прозрачная
7	7	4,2	0,82	0,12	–	–	24,63	85,19	–	коричневая	прозрачная

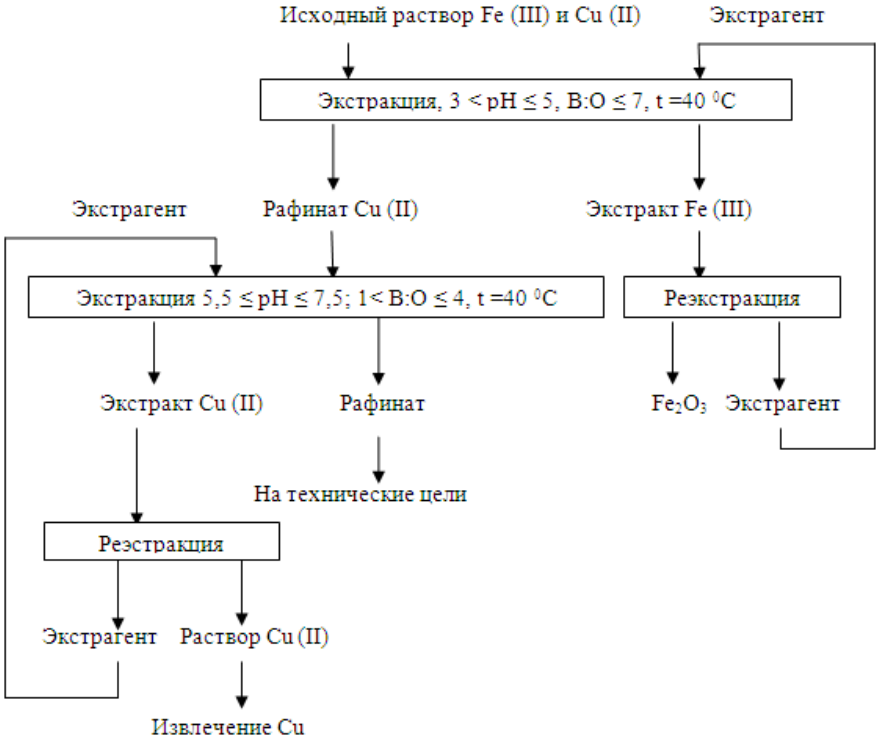


Рис. 3. Принципиальная технологическая схема извлечения ионов Cu(II) и Fe(III) из водного раствора смеси их солей

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

тракция может быть осуществлена раствором серной кислоты, причём в процессе реэкстракции происходит дальнейшее разделение металлов: в первых порциях реэкстракта выделяется больше меди, чем железа.

Исходя из экспериментальных данных, разработана технологическая схема процесса экстракционного извлечения ионов Cu(II) и Fe(III) из водных растворов их солей (рис. 3).

Выводы

Селективное извлечение ионов Cu(II) и Fe(III) из водного раствора смесью олеиновой кислоты и триэтаноламина в керосине следует осуществлять в две стадии: 1 стадия – извлечение Fe(III) при 3< pH≤5, B:O≤7 и температуре *t*=40 °C; 2 стадия – извлечение Cu(II) при 5,5≤pH≤7,5; 1<B:O≤4 и *t*=40 °C. Совместное извлечение железа и меди следует осуществлять при 5,5≤pH≤7,5; 1<B:O≤4 и *t*=40 °C.

Список литературы

1. Extraction of Leaching Solution with Low Ni and Co Content / Wang Fuxing [et al.] // Xiyou jinshu (Chinese Journal of Rare Metals). – 2011. – Vol.35, Issue 5. – P. 753-758.
2. Wieszczycka K. Recovery of Zn(II) from multielemental acidic chloride solution with hydrophobic 3-pyridineketoxime // Separation and Purification Technology. – 2013. – Vol.114. – P. 17-23.
3. The modelling of ZnCl2 extraction and HCl co-extraction by TBP diluted in ShellSol 2046 / K.H. Lum [et al.] // Hydrometallurgy. – 2013. – Vol.133. – P. 64-74.
4. Voropanova L.A., Velichko L.N. Extraction of copper (II), nickel (II), cobalt (II) chromium (III) and iron (II, III) ions from aqueous solutions with a technical lubricant // Russian Journal of Applied Chemistry. – 1999. – Т.72, №11. – С. 1970-1975.
5. Воропанова Л.А. Обезвреживание стоков, содержащих ионы цветных металлов, путём экстракции их смесью олеиновой кислоты и триэтаноламина // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 2001. – №5. – С. 32-38.

L.A. Voropanova /Dr. Sci. (Eng.)/
The North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University) (Vladikavkaz)
N.T. Kisiev, Z.A. Gagieva /Cand. Sci. (Eng.)/
OJSC "MMC "Norilsk Nickel" (Norilsk)

EXTRACTION OF IRON AND COPPER IONS BY A MIXTURE OF OLEIC ACID AND TRIETHANOLAMINE IN KEROSENE

Background. *Solutions obtained by leaching of poor raw materials, solutions of the heap and underground leaching, wastewater, mine waters contain along with non-ferrous metal salts of iron and copper. Selective extraction of ions of iron and copper from such solutions by deposition is difficult. Therefore, the joint and selective extraction of ions of iron and copper is an actual scientific and technical problem.*

Materials and/or methods. *The conditions of the joint and selective extraction of ions of iron and copper from solutions of their salts' mixture were determined using as extra agent a mixture of oleic acid and triethanolamine in kerosene in a volume ratio 12:6:82, respectively.*

Results. *The selective extraction of ions of Cu(II) and Fe(III) from an aqueous solution of a mixture of oleic acid and triethanolamine in kerosene should be carried out in two stages: stage 1 – extraction of Fe (III) when 3<pH≤5, B:O≤7 and t°=40 °C; stage 2 – extraction of Cu(II) with 5,5≤pH≤7,5; 1<B:O≤4 and t°=40 °C. The joint extraction of iron and copper should be carried out at 5.5≤pH≤7,5; 1<B:O≤4 and t°=40 °C.*

Conclusion. *The developed method of extraction by a mixture of oleic acid and triethanolamine in kerosene provides a high selectivity of extraction of iron ions from aqueous solutions of salts of iron and copper, as well as high joint extraction of iron and copper.*

Keywords: *extraction, oleic acid, triethanolamine, kerosene, aqueous solution, iron, copper.*

Статья поступила 17.01.2016 г.
© Л.А. Воропанова, Н.Т. Кисиев, З.А. Гагиева, 2016
Рецензент д.т.н., проф. Ю.Б. Высоцкий

УДК 532.525

Н.И. Захаров /д.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНВЕКТИВНОЙ ДИФФУЗИИ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕЖИМЫ ТЕХНОЛОГИИ ВНЕПЕЧНОЙ ДЕГАЗАЦИИ РАСПЛАВА СТАЛИ ОТ ВОДОРОДА КОМПЛЕКСНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

На основе разработанной математической модели проведен численный анализ эффективности конвективной диффузии водорода в жидкой ванне (степени ее дегазации) от технологических параметров. Показан количественно убывающий характер зависимости этой характеристики от диаметра пор продувочного устройства, давления в вакуум-камере и концентрации поверхностно-активной серы в расплаве. Зависимости от глубины жидкой ванны и интенсивности продувки возрастающие, но до некоторого уровня, после которого рост эффективности диффузионного процесса прекращается. Снижение интенсивности продувки до уровня оптимума экономит дорогостоящий аргон. Дополнительным фактором энергосбережения является предварительная продувка расплава аргоном в период выпуска стали из плавильной печи, а также использование электростатического поля малых напряжённостей.

Ключевые слова: *конвективная диффузия, математическая модель, жидкая ванна, водород, интенсивность продувки, вакуум-камера, электростатическое поле, энергосбережение.*

Постановка проблемы

Современная технология внепечной дегазации расплава стали от водорода характеризуется, как известно, избыточными затратами энергоносителей. Избыток водорода в стали способствует трещинообразованию в слитках, формированию в них флокенов. Для его удаления наиболее перспективно применение различных способов внепечной обработки расплавов.

Высокой эффективностью обладает продувка жидкого металла аргоном через пористые элементы в сочетании с вакуумированием [1]. Пористые элементы с большим количеством пор малого размера обеспечивают значительную интенсивность процессов конвективной диффузии водорода в жидкой ванне вследствие высокого значения суммарной площади поверхности контакта «аргон-металл» за счет большого количества всплывающих в расплаве пузырей этого инертного газа [2].

В развитых странах (Япония, США и др.) этот способ дегазации жидкого металла получил широкое распространение [3-5]. По мере развития огнеупорной промышленности стран СНГ в направлении производства надежных пористых блоков (эта тенденция сохраняется и за рубежом [6-8]) можно ожидать применения рассматриваемого способа дегазации металла и в этих странах. В связи с этим, развитие теоретических основ процессов конвективной диффузии в условиях рассматриваемой технологии требует пристального внимания.

«Холодное» моделирование процессов конвективной диффузии при внепечной дегазации жидкого металла от водорода продувкой инертным газом через пористые элементы, как известно, проблематично из-за сложности обеспечения равенства критериев подобия в реальных условиях и на «холодной» модели. Более предпочтительным может быть математическое моделирование, результаты которого количественно согласуются с данными «горячего» моделирования и качественно – с результатами «холодного» моделирования.

Математическое моделирование рассматриваемых процессов позволяет разработать их энергосберегающие режимы, что является актуальной проблемой.

Анализ последних исследований и публикаций

Математическая модель конвективной диффузии водорода в жидкой ванне строится с учётом современных представлений о технологии внепечной дегазации расплава стали. Эти представления вкратце сводятся к следующему.

1. Дегазирующее действие вакуума и всплывающих в жидком металле пузырей аргона происходит вследствие разности концентраций водорода в объёме жидкой ванны и на межфазных

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

поверхностях «вакуум-металл» и «аргон-металл».

2. Наибольшей эффективностью конвективная диффузия водорода в расплаве, как и технология в целом, обладает при пузырьковом режиме внедрения аргона в металл [1]. Переходный и струйный режимы продувки приводят к снижению площади поверхности контакта «аргон-металл».

3. В области пузырькового режима продувки существует её оптимальная интенсивность, которая определяется конкуренцией двух факторов при возрастании интенсивности продувки. Это, с одной стороны, увеличение количества пузырей аргона, а, с другой стороны, снижение времени их контакта с расплавом вследствие возрастания скорости всплывания пузырей [1,2].

4. Наличие в расплаве поверхностно-активной серы замедляет технологию. Это происходит вследствие блокирования атомами серы части межфазных поверхностей «вакуум-металл» и «аргон-металл». При этом возрастание концентрации этого элемента приводит к увеличению площади блокирования [2].

5. Существенное влияние на результаты технологии оказывает характер распределения подаваемого в жидкую ванну аргона по днищу ковша. В случае, когда целью продувки металла инертным газом является дегазация, то наиболее эффективной является продувка через пористое днище ковша, которая обеспечивает относительно равномерное распределение пузырей аргона по объёму расплава [1].

Наиболее полное математическое описание процессов конвективной диффузии содержится в работах [9-11], однако в работе [9] оно дается применительно к пузырям окиси углерода. В работе [10] учитывается влияние на коэффициенты массопереноса лишь концентрации поверхностно-активных элементов расплава, но не режимов всплывания пузырей инертного газа. Предлагаемая математическая модель обобщает результаты работ [11,12].

Цель (задачи) исследования

Цель настоящей работы заключается в разработке режимов энергосбережения при реализации технологии на основе математической модели конвективной диффузии водорода в расплаве металла.

Основной материал исследования

Численное исследование процессов конвективной диффузии в условиях рассматриваемой технологии проведено на основе разработанной математической модели.

В ее основе лежат следующие допущения:

– однородность концентрации удаляемого водорода по объему жидкой ванны вследствие перемешивающего действия пузырей аргона (за исключением диффузионных пограничных слоев на границах «аргон-металл» и «вакуум-металл»);

– постоянство температуры расплава по его объему и времени;

– на границах «аргон-металл» и «вакумм-металл» достигается термодинамическое равновесие;

– смесь аргона и водорода в пузырях инертного газа является идеальной (в термодинамическом смысле);

– перенос газов в расплав извне отсутствует.

Математическая модель процессов конвективной диффузии в условиях внепечной дегазации жидкого металла всплывающими пузырями инертного газа при вакуумировании имеет вид:

$$\varepsilon = \frac{1}{Q_н}\int\limits_{(x\,y\,z\,\tau)}\int\int\int j(x,y,z,\tau)n(x,y,z,\tau)dxdydzd\tau + \\ + \frac{1}{Q_н}\int\limits_{(x\,y\,\tau)}\int\int j(x,y,\tau)n(x,y,\tau)dxdyd\tau, \qquad (1)$$

Поскольку вдуваемый в расплав газ инертный, его масса в каждом пузыре постоянна на протяжении всего пути его всплывания. Это обстоятельство позволяет величину n в момент времени τ представить как

$$n = \frac{\dot{m}\tau_p}{m_0 V}.$$

Для режима прямотока используем последовательный массоперенос в течение времени τ' всплывания фиксированного пузыря:

$$\tau_p = \int\limits_{\tau'} d\tau'.$$

В этом случае уравнение (1) примет вид

$$\varepsilon = \frac{1}{Q_н}\int\limits_0^{\tau_в}\frac{\dot{m}}{m_0}\int\limits_0^{\tau'} j_{ср}(\tau,\tau')d\tau' d\tau + \frac{F}{Q_н}\int\limits_0^{\tau_в} q_{ср}(\tau)d\tau, \qquad (2)$$

где j и q – плотность потока массы водорода на межфазные поверхности «аргон-металл» и «вакуум-металл», соответственно; $j_{ср}$ и $q_{ср}$ – их средние значения по объёму расплава и поверхности «вакуум-металл»; F – её площадь; m_0 – масса аргона в единичном пузыре; $\dot{m}$ – массовый расход инертного газа; n – число пузырей в единице объёма V жидкой ванны; $Q_н$ – начальная

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

концентрация в ней водорода; x, y, τ – декартовые прямоугольные координаты; ε – эффективность конвективной диффузии водорода (степень дегазации металла); τ', $\tau_в$ и $\tau_р$ – время продувки текущее, выпуска металла в ковш и релаксации.

Искомая функция τ в зависимости от параметров процесса (например, интенсивности продувки) при фиксированном ε формирует верхний предел интегрирования. Таким образом, уравнение (2), в соответствии с общепринятой классификацией, является интегральным.

Сложность решения уравнения (2) связана с многообразием режимов всплывания газовых пузырей в жидкости, каждому из которых соответствуют свои зависимости j [13].

На рис. 1 и 2 показаны графики степени дегазации от водорода расплава раскисленной стали в функции технологических параметров для способа обработки металла малой емкости в вакуум-камере. Как следует из приведенных графиков, снижение давления в вакуум-камере приводит к интенсификации процессов конвективной диффузии. При этом увеличение концентрации [S] поверхностно-активной серы (рис. 1а), диаметра $d_п$ пор продувочного устройства (рис. 1б), уменьшение глубины жидкой ванны (рис. 2а) и снижение интенсивности Ω продувки металла аргоном ($\Omega<\Omega_{опт}$, рис. 2б) снижают эффективность этих процессов и отрицательно сказываются на интенсификации технологии.

На рис. 1 и 2 использованы следующие обозначения параметров: p – давление в вакуум-камере; $T_м$ – температура металла; M – его масса; [C] и [S] – концентрации углерода и серы в расплаве; L – глубина жидкой ванны; Ω – интенсивность продувки аргоном.

Снижение эффективности конвективной диффузии водорода в жидкой ванне при увеличении концентрации поверхностно-активной серы объясняется блокировкой ею части межфазных поверхностей «аргон-металл» и «вакуум-металл», что ведет к снижению интенсивности диффузионного процесса [2].

Уменьшение диаметра пор продувочного устройства при фиксированной интенсивности продувки приводит к увеличению площади межфазной поверхности «аргон-металл», и, соответственно, интенсификации конвективной диффузии [2].

Рост глубины жидкой ванны (высотного уровня зеркала расплава в ковше) ведет к увеличению пути всплывания пузырей аргона и их большему насыщению водородом. Вместе с тем, сближение кривых при увеличении L объясняется тенденцией уменьшения во времени диффузионных потоков для поверхности каждого из пузырей при их насыщении этим газом [2].

Существование оптимальной интенсивности $\Omega_{опт}$ продувки стали инертным газом можно объяснить конкуренцией двух факторов. С одной стороны, при увеличении Ω растет количество пузырей аргона, внедряемых в расплав в единицу времени и, соответственно, наблюдается повышение площади межфазной поверхности «аргон-металл». С другой стороны, рост Ω приводит к увеличению размера пузырей, выходящих из пор продувочного устройства и, соответственно, к снижению времени их контакта с жидкой ванной и меньшему их насыщению водородом [1].

Снижение интенсивности продувки до уровня оптимума – фактор экономии аргона.

На рис. 3 показано сравнение результатов

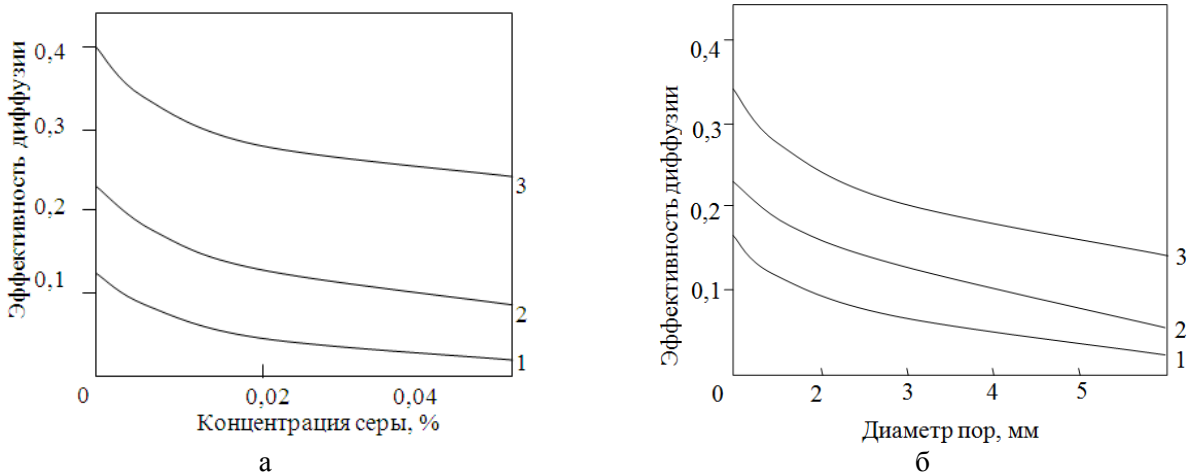
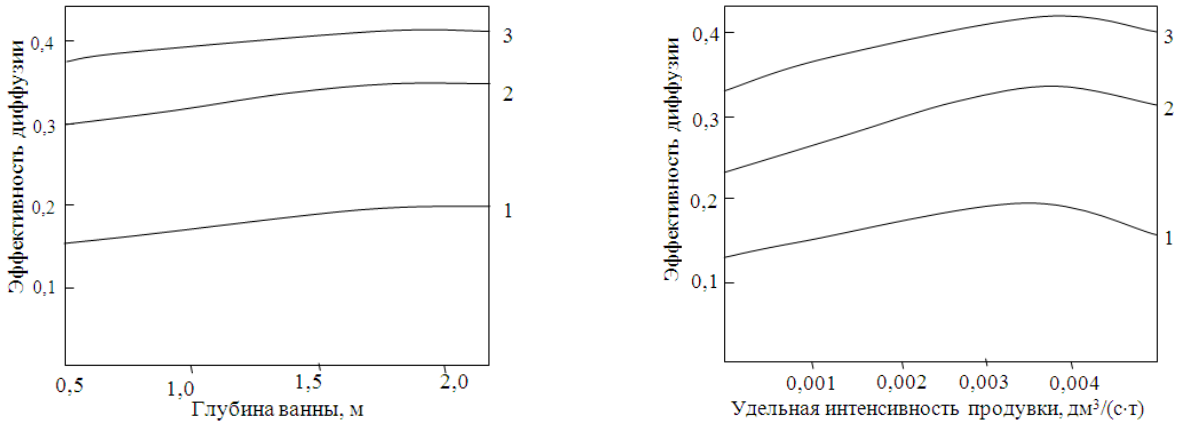


Рис. 1. Зависимость эффективности диффузии в расплаве раскисленной стали от концентрации поверхностно-активной серы (*а*) и диаметра пор продувочного устройства (*б*) ($T_м$=1600 °С; M=30 т; [C]=0,7 %; [S]=0,02 %; Ω=0,0035 дм^3/(с·т); $\tau_в$=15 мин.; $d_п$=3 мм; L=2 м): *1* – P=600 Па; *2* – P=400 Па; *3* – P=200 Па

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б

Рис. 2. Зависимость эффективности диффузии в расплаве раскисленной стали от глубины жидкой ванны (*а*) и удельной интенсивности рассредоточенной по огнеупорному блоку с направленной пористостью продувки аргоном (*б*) ($T_м$=1600 °С; M=30 т; [С]=0,7 %; [S]=0,02 %; Ω=0,0035 дм^3/(с·т); $\tau_в$=15 мин.; $d_п$=3 мм; L=2 м): *1* – P=600 Па; *2* – P=400 Па; *3* – P=200 Па

расчёта на основе разработанной математической модели с данными лабораторных исследований [14]. Сопоставление кривых для лабораторных 1 и расчётных 2 результатов говорит об их удовлетворительной сходимости. При этом качественное поведение кривых идентично. Расхождение в количественном отношении, не превышающее 5-8 %, объясняется известным отклонением системы от состояния термодинамического равновесия, положенного в основу построения математической модели. Кривая 4 (рис. 3) отвечает результатам моделирования процесса дегазации при наличии допущения отсутствия поверхностно-активных элементов в металле. Как следует из относительного сопоставления кривых, учёт адсорбции поверхностно-активных элементов расплава пузырьковой поверхностью даёт результат, который значительно лучше согласуется с экспериментальными данными. Результаты проведённого компьютерного моделирования качественно согласуются и с данными экспериментальных исследований работы [15], проведенных на «холодной» модели.

Дополнительными факторами энергосбережения являются:

1. Предварительная ($\tau<\tau_в$) продувка расплава аргоном во время выпуска из плавильной печи в ковш при атмосферном давлении под слоем синтетического шлака. Эффективность этой обработки жидкого металла связана с его перемешиванием падающей струёй расплава из печи в ковш [12]. По завершению выпуска стали остаётся лишь довести её до требуемой кондиции, подключая вакууматор, что экономит аргон. Кроме того, как правило, отсутствует необходимость дополнительного подогрева металла перед его выпуском.

2. Дополнительным фактором энергосбережения является также использование электростатического поля малых напряжённостей E, таких, что $E<<E_{кр}$. При этом критическое значение напряжённости $E_{кр}$, срывающее ионы водорода с межфазной поверхности «вакуум-расплав металла» для различных марок стали, находится в диапазоне 0,3-1,8 МВ/м [2].

Электростатическое поле малых напряженностей не в состоянии ни сорвать ионы удаляемого водорода (протоны) с межфазной поверхности «вакуум-металл», ни перераспределить их по ней.

Вместе с тем, при подаче постоянного отрицательного электрического потенциала на электрод подогрева вакуум-камеры (при завершении подогрева металла) и заземлении ковша, в полости вакууматора создается незначительная разность потенциалов, которая, тем не менее, может перемещать протоны в этом пространстве, образуя электрический ток. Его значение незначительно, поскольку являются малыми величинами и разность потенциалов и концентрация протонов в полости вакууматора.

Суть идеи использования влияния электростатического поля на процессы конвективной диффузии при дегазации металла заключается в следующем. Ковш 5 с расплавом герметично накрывается крышкой 3 (рис. 4). В крышку монтируется изолированный электрод 2, на который подается отрицательный электрический потенциал. Второй электрод 4 имеет контакт с жидким металлом. Вакуум-насосом через патрубок 1 создается разряжение. При наличии напряжения между электродами в пространстве под крышкой при создании соответствующих условий возникает ток. Сила тока зависит от значения электри-

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

ческого напряжения, его знака, а также концентрации заряженных частиц, формирующих ток.

Рассмотренная идея послужила основой для проведения опытно-промышленных исследований в электросталеплавильном цехе Донецкого металлургического завода. Вакуумирование стали проводилось усовершенствованным видом порционного вакууматора (с продувкой аргоном в его патрубке) фирмы «Vakmetal» [16].

Важной задачей являлось исследование возможности повышения производительности установки внепечной обработки металла энергосберегающим способом при интенсификации процессов конвективной диффузии.

Поскольку в период проведения исследований вакуумированию подвергался раскисленный металл, можно утверждать, что кислород в расплаве находился, как правило, в виде оксидных включений. Поэтому, при существующей технологии вакуумирования, с подачей отрицательного потенциала на электрод и заземлении ковша с металлом может удаляться только водород.

Вследствие того, что в промышленных условиях изменить конструкцию вакууматора и его элементов затруднительно, то за рабочий орган при проведении исследований взят функциональный графитовый электрод для подогрева вакууматора. Последний выполняет роль приемника заряженных частиц при подаче на него электрического потенциала.

Основное внимание в исследованиях уделялось фиксированию электрического тока, обусловленного переносом в пространстве вакууматора положительно заряженных частиц при подаче на электрод отрицательного потенциала и заземление ковша с металлом.

Необходимо отметить, что незначительные напряженности электростатического поля в полости вакууматора (напряжения 36; 150; 500 В, распределенные на большой пространственный промежуток между металлом и электродом патрубка) не вызвал, как и предполагалось, ощутимого эффекта интенсификации массообменных процессов. На это указали результаты экспериментов, из которых следовало незначительное влияние электростатического поля малых напряженностей на интенсификацию процессов конвективной диффузии.

Способ подвода напряжения к вакуумному промежутку состоял в следующем. Перед началом вакуумирования отключается напряжение от трансформатора, ответственного за подогрев электрода, после чего к электроду подключается соответствующее напряжение постоянного тока от автономного трансформатора. При этом электрический ток фиксировался по самописцу.

Была проведена серия плавок с определением характера зависимости содержания водорода в металле от уровня тока эмиссии в конце процесса вакуумирования. С этой целью были проведены плавки с различным количеством циклов. Это выражалось в том, что на одних плавках вакуумирование прерывали на высоком значении электрического тока, а на других плавках вакуумирование продолжали до нулевого значения тока.

Как показывает анализ опытно-промышленных данных, небольшое значение силы тока эмиссии в конце вакуумирования соответствует и низкому содержанию водорода в металле. Полученная зависимость легла в основу разработанного способа энергосбережения.

Физический смысл этой зависимости состоит в том, что незначительное значение тока в конце вакуумирования указывает на относительную завершенность процесса дегазации. В этих условиях дальнейшее продолжение циклов вакуумирования становится малоэффективным и приводит лишь к незначительному снижению концентрации водорода в металле.

Следовательно, практически целесообразно оканчивать циклы вакуумирования по достижении нулевого значения тока. В этом заключается способ энергосбережения при повышении производительности установки внепечной дегазации металла. Проведенный промышленный эксперимент подтвердил способность высокой температуры хотя бы частично ионизировать водород в расплаве стали вследствие непрочности атомов этого газа.

Характер найденной экспериментальным путем зависимости указывает на то, что чем меньше значение электрического тока в межэлектродном пространстве, тем меньше водорода

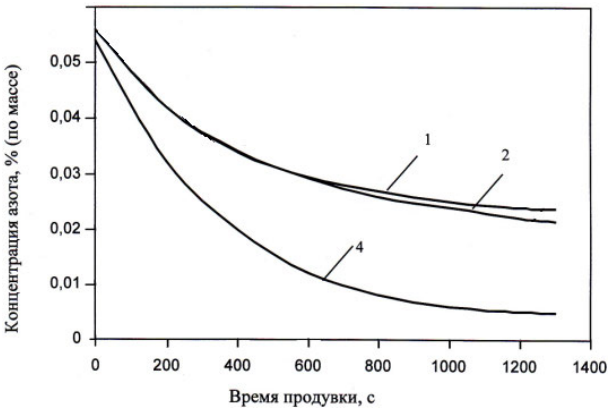


Рис. 3. Зависимость концентрации газа в расплаве от времени продувки:
1 – лабораторные данные; *2* – расчёт модели; *3* – расчёт без учёта поверхностно-активных элементов

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

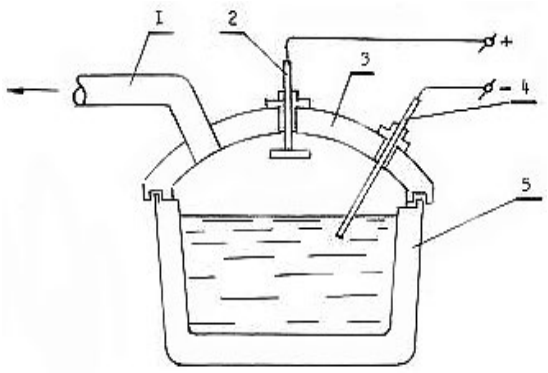


Рис. 4. Общая схема рафинирования жидкого металла электростатическим полем: *1* – патрубок к вакуум-насосу; *2* – электрод (катод); *3* – крышка; *4* – электрод (анод); *5* – ковш с жидким расплавом

выходит из расплава стали в единицу времени, т.е. тем меньше водорода в жидкой ванне.

Таким образом, зафиксированный ток имеет водородную (протонную) природу. В данной работе даётся обобщение результатов работы [16] на способ дегазации стали в ковше малой ёмкости (M=30 т).

Следуя известному механизму дегазации жидких металлов, атомы и ионы удаляемого водорода на рассматриваемой межфазной поверхности перед тем, как покинуть ее, должны молизировать с образованием нейтральных молекул водорода. Работа выхода ионов с границы «вакуум-металл» существенно выше, чем нейтральных молекул. Таким образом, наиболее вероятными причинами наличия ионов в полости вакууматора являются:

а) ионизация молекул водорода (диссоциация их с последующей ионизацией атомов) в этом пространстве вследствие высокой температуры полости вакууматора (вероятность ионизации других молекул существенно ниже по причине сравнительной непрочности молекул и атомов водорода);

б) взаимное отталкивание незначительной части протонов, находящихся в непосредственной близости друг к другу на зеркале металла. Сообщаемая при этом одному из протонов пары частиц кинетическая энергия может быть достаточна для преодоления сил его сцепления с межфазной поверхностью «вакуум-металл» и протон, покидая ее, участвует в формировании электрического тока в полости вакууматора.

Оценим расчетным путем долю ионов водорода (протонов), формирующих электрический ток, в общем количестве частиц этого газа, покидающих расплав металла в процессе внепечной дегазации.

Электрический заряд, вынесенный током в полости вакууматора:

$$Q = \bar{J}\tau_1 N_в .$$

Следовательно, общее количество протонов N_n, перенесенных этим током:

$$N_n = \frac{Q}{e_1} = \frac{\bar{J}\tau_1 N_в}{e_1},$$

где τ_1 и $N_в$ – длительность одного элемента вакуумирования и их общее количество; e_1 – заряд одного протона; $\bar{J}$ – среднее значение электрического тока за время внепечной дегазации металла.

Общее количество протонов, вышедших из жидкой ванны, связано со средней величиной $\overline{\Delta c}$ снижения концентрации этого газа за время вакуумирования. Найдем эту связь.

Пусть: M – масса расплава металла в ковше; $U=M/\rho_м$ – объем жидкого металла; $m = \overline{\Delta c} U$ – масса водорода, покинувшего расплав; $N=m/m_1$ – количество протонов, вышедших из жидкой ванны за время вакуумирования.

Следовательно, доля ионов водорода (протонов), формирующих электрический ток, в общем количестве протонов, покидающих расплав металла за время вакуумирования:

$$\frac{N_n}{N} = \frac{1}{\overline{\Delta c}} \bar{J} \left(\frac{\rho_м}{M}\right)\left(\frac{m_1}{e_1}\right)\tau_1 N_в ,$$

где $\rho_м$ – плотность жидкого металла; m_1 – масса протона.

Доля ионов водорода, формирующих электрический ток, в общем количестве атомов, покидающих расплав стали в процессе внепечной дегазации:

$$\frac{N_э}{N} = \left(\frac{\bar{J}}{\overline{\Delta c}}\right)\left(\frac{\rho_м}{M}\right)\left(\frac{m_1}{e_1}\right)\tau_1 N_в .$$

Исходные данные к расчету: $\rho_м$=7 г/см^3; M=30 т=0,3·10^8 г; m_1=1,67·10^{-24} г; e_1=+1,6·10^{-19} Кл; τ_1=20 с; $N_в$=60; $\bar{J}$ =100 мА=0,1 Кл/с; $\overline{\Delta c}$ =4 см^3/100 г≈0,3·10^{-4} г/см^3.

Как показывает расчет N_n/N≈0,03. Малость значения подтверждает известный тезис о том, что перед отрывом с межфазной поверхности «вакуум-металл» ионы и атомы водорода должны, как правило, объединиться в нейтральные молекулы, легко преодолевающие силы притяжения Ван-Дер-Ваальса со стороны этой поверхности.

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

При формировании этого тока, по-видимому, работают оба из предложенных выше механизмов.

Исходя из первого из них, имеет место частичная ионизация атомов водорода в полости вакууматора. При фиксированных её температуре и степени ионизации незначительная величина концентрации водорода в расплаве стали в конце вакуумирования приводит и к уменьшению интенсивности поступления водорода из жидкой ванны в вакуум-камеру. Это снижает количество ионизированных частиц в вакуум-камере и, соответственно, уменьшает в ней электрический ток, что согласуется с результатами опытно-промышленных исследований.

В рамках второго из механизмов, чем меньше водорода в расплаве, тем меньше ионов этого газа на поверхности «вакуум-металл», т.е. тем больше среднее расстояние между соседними протонами и, соответственно, меньше вероятность ситуации очень близкого случайного расположения пары протонов, один из которых отталкивает другой в полость вакууматора, минуя стадию их традиционной молизации. Дополнительным подтверждением правильности этой гипотезы является отсутствие электрического тока при ненулевой концентрации водорода в металле (≈3 $см^3$/100 г для выбранной марки стали). В этих условиях среднее расстояние между соседними протонами на этой поверхности столь велико, что оно исключает ситуацию выброса ощутимой части протонов с межфазной поверхности в полость вакууматора без стадии их традиционного объединения в нейтральные молекулы водорода. По-видимому, второй из предложенных механизмов вносит основной вклад в формирование электрического тока в вакуум-камере, поскольку температура ее полости ниже температуры расплава в ковше.

В зависимости от требований технологии по содержанию водорода для конкретной марки стали и концентрации этого газа в жидкой ванне, обеспечивающей нулевое значение электрического тока в вакуум-камере, принимается решение о своевременном (электросберегающем) окончании обработки расплава.

Выводы

Проведено исследование зависимости эффективности конвективной диффузии водорода в расплаве стали от технологических параметров. Показано, что в функции интенсивности продувки металла аргоном эта зависимость проходит через максимум при некотором оптимальном значении Ω. Снижение интенсивности продувки до уровня оптимума – шаг к энергосбережению.

Дополнительными факторами энергосбережения являются предварительная продувка расплава аргоном во время его выпуска из плавильной печи в ковш под слоем синтетического шлака, а также использование электростатического поля малых напряжённостей.

Список литературы

1. Борнацкий И.И., Мачикин В.И., Живченко В.С. Внепечное рафинирование чугуна и стали. – Киев: Техника, 1976. – 168 с.
2. Захаров Н.И., Троянский А.А., Троцан А.И. Энергоресурсосбережение при рафинировании жидкой стали от газов. – Мариуполь: ПГТУ, 2015. – 190 с.
3. Пат. 57-200514 Япония, МКИ С21С 7/10, С22В 9/04. Повышения эффективности процесса дегазации жидкой стали / И. Мариуюки. – №56-84323; заявл. 03.06.1981; опубл. 08.12.1983, Бюл. №57
4. Пат. 466614 Япония, МКИ С21С 7/10. Способ дегазации расплавленного металла / М. Иосимока, Ц. Наохито. – №2-177493; заявл. 11.12.1990; опубл. 03.03.1992, Бюл. №19.
5. Wang L., Lee H., Haeyes P. A new approach to molten steel refining using gas bubbles / ISIJ Int. – 1996. –Vol.36, No.1. – P. 17-19.
6. Endel R., Marr R., Pretorius E. Refractory. Slag systems for ladles and secondary refining processes. Part VII. Refractory / Iron Steel Mark. – 1996. – Vol.23, No.10. – P. 109-114.
7. Пат. 36317 Япония, МКИ С21С 7/0172. Способ рафинирования стали в ковше / М. Эйдзи, К. Йоситэру, Т. Тосио, К. Иосихико. – №1139332; заявл. 02.06.1989; опубл. 11.01.1991, Бюл. №69.
8. Пат. 3297537 Япония, МКИ В22D 1/00. Пористый кирпич для донной продувки металла в ковше / Т. Мицухиро, Т. Хисаси, Х. Тэруюки. – №2-98576; заявл. 12.07.1989; опубл. 27.12.1991, Бюл. №64.
9. Явойский В.И., Борзунов В.П., Щербаков В.А. Математическое моделирование процесса удаления водорода из жидкой стали под вакуумом в ковшевой печи / Физико-химические основы вакуумных процессов в чёрной металлургии. – М.: Металлургия, 1984. – С. 46-48.
10. Turkan S., Lange K. Entgasung von Metallschmelzen mit Blasenchwarmen / Steel Res. – 1985. – Bd.56. – P. 247-249.
11. Захаров Н.И., Борнацкий И.И., Туяхов А.И. Математическая модель массопереноса для дегазации металлургических расплавов всплывающими пузырями инертного газа / Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 1989. –

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

№9 – С. 30-33.
12. Захаров Н.И., Недопёкин Ф.В., Троцан А.И. Математическое моделирование конвективной диффузии при внепечной дегазации стали всплывающими пузырями инертного газа / Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т.78, №3. – С. 68-71.
13. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Физматгиз, 1959. – 537 с.
14. Masamitsu T., Hiromu M., Masamichi S. Rateof nitrogen desorption the molten iron by argon flowing / Iron Steel Inst. Lap. – 1986. – Vol.72, No.3 – P. 419-423.
15. Захаров Н.И., Харлашин П.С., Троцан А.И. Экспериментальное исследование процессов внепечной дегазации металла продувкой инертным газом / Процессы литья. – 2002. – №4. – С. 21-24.
16. Дюдкин Д.А., Захаров Н.И. К вопросу энергосбережения при дегазации металла / Металл и литьё Украины. – 1996. – №3. – С. 17-18.

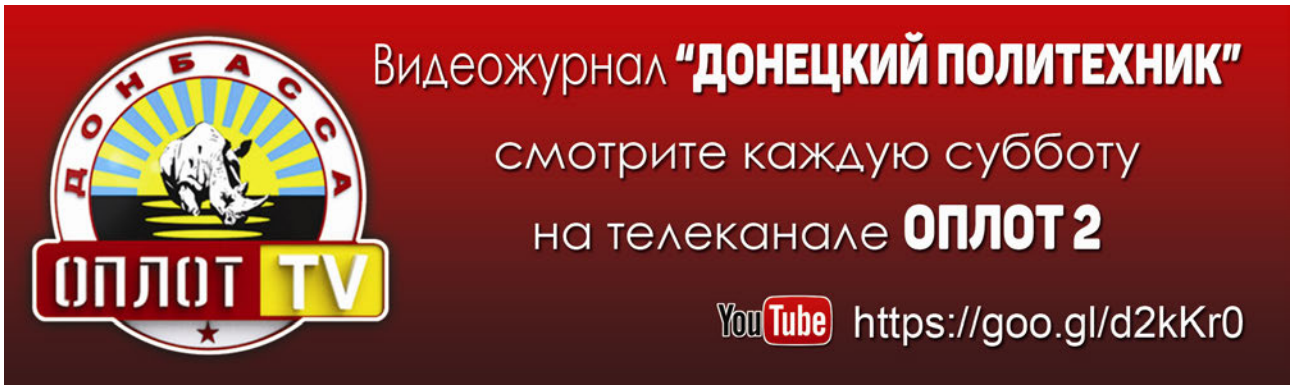
N.I. Zakharov /Dr. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

MATHEMATICAL MODELING OF CONVECTIVE DIFFUSION PROCESSES AND THE POWER SAVING MODE OF LADLE DEGASSING OF THE MOLTEN STEEL FROM THE HYDROGEN BY COMPLEX INFLUENCE

Background. *Energy saving in the domestic steel industry is an actual scientific and technical problem. Proposed the solution of the problem with regard to the technology of ladle steel degassing from hydrogen by the complex influence of vacuum, purging with argon and an electric field of small strength.*
Materials and/or methods. *The method of computer simulation based on the mathematical model of convective diffusion of hydrogen in the melt is used. The model is consistent with the data of "hot" and "cold" simulation.*
Results. *Quantitatively studied the dependence of the efficiency of convective diffusion of hydrogen in a liquid bath (the degree of degassing) on the intensity of purging with argon, the pore diameter of the purge device, design of surface-active elements in the metal, the depth of the melt, the pressure in the vacuum chamber. It is shown that the decrease in the intensity of the purge to the level of optimum saves energy.*
Conclusion. *Additional factors of energy saving are the pre-treatment of the molten steel by purging with argon during the release of the metal into a ladle under a layer of synthetic slag and the use of electrostatic fields of small strength.*

Keywords: *convective diffusion, mathematical model, liquid bath, hydrogen, purging rate, vacuum chamber, electrostatic field, energy saving.*

Статья поступила 09.04.2016 г.
© Н.И. Захаров, 2016
Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронько



ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

УДК 669.788

А.В. Ветчинов /к.ф.-м.н./, Т.А. Щеголева, В.А. Гольцов /д.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ВОДОРОДНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Рассмотрена созданная экспериментальная установка и методика изучения формоизменения металлических пластин при их одностороннем электролитическом насыщении водородом. Данная установка позволит изучать физические особенности проникновения водорода в стали и выработать практические рекомендации эксплуатации оборудования водородосодержащих производств.

Ключевые слова: *водородные напряжения, формоизменение пластины, водородоупругость.*

Постановка проблемы

В настоящее время интенсивно развивается новая область материаловедения – водородная обработка материалов, целью которой является улучшение структуры и свойств материалов путем применения водорода для их обработки.

Внедренные атомы водорода вызывают расширение кристаллической решетки металла. Поэтому любые концентрационные неоднородности водорода, независимо от причин их появления, приводят к возникновению в твердом теле внутренних водородных напряжений. Также, как и термические [1], водородные напряжения должны учитываться во всех технологиях, когда материалы эксплуатируются в контакте с водородом или водородосодержащими средами. Например, стенки любых аппаратов химического и нефтехимического производства, термоядерных реакторов, газопроводов, мембранных палладиевых фильтров из-за наличия градиентов концентрации водорода подвергаются действию внутренних водородных напряжений, которые являются важным фактором, влияющих на их эксплуатационное поведение. Наглядным макроскопическим проявлением действия водородных напряжений является формоизменение металлических образцов во время проникновения в них водорода. Поэтому задача по изучению формоизменения металлических пластин актуальна как с научной, так и с практической точек зрения.

Анализ последних исследований и публикаций

В целом по взаимодействию водорода с металлами опубликовано много научных работ [2]. Внутренние водородные напряжения, обусловленные градиентами концентрации водорода, принято называть водородными концентрационными напряжениями. В зависимости от соотношения между водородными концентрационными напряжениями и пределами пропорциональности или прочности металла в неравновесных условиях в системах металл-водород развиваются явления водородоупругости, водородопластичности или происходит водородное разрушение материала. Если водородные концентрационные напряжения не превосходят предел пропорциональности металла и, соответственно, не развивается водородофазовый наклеп [3], то в этом случае в системах металл-водород имеет место явление водородоупругости, при котором все изменения в металлической и водородной подсистемах самосогласованны. Такая взаимообусловленность реагирования системы на изменение внешних и внутренних факторов вызывает в металлах целый ряд водородоупругих эффектов, которые лежат в основе многих видов водородной обработки материалов. Это такие явления как эффект Горского, диффузионно-упругий эффект (эффект Стони), эффект Льюиса. Современные представления о водородоупругих эффектах обобщены в работе [4].

Водородоупругие эффекты широко используются для определения коэффициентов диффузии водорода в металле, для исследования термодинамических характеристик, определяющих фазовые переходы и условия равновесия в системах металл-водород.

Формоизменение упругонапряженной палладиевой пластины под воздействием проникающего в металл из газовой фазы водорода исследовано в работе [5]. Опыты проводились в области относительно низких температур (100-150 °С) и невысоком давлении водорода вблизи критической точки начала гидридного превращения. Авторами экспериментально установлено, что на величину формоизменения оказывают влияние такие факторы как температура, давление водо-

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

рода и число циклов водородного воздействия.

В работах [6-9] изучено водородоупругое формоизменение палладия (в виде пластины) при температурах от 110 до 350 °С и давлениях газообразного водорода до 0,43 МПа. В частности установлено [6-9], что скорость роста давления газообразного водорода, контактирующего с пластиной, является весьма сильным экспериментальным параметром, определяющим закономерности индуцированного водородом формоизменения пластины. При уменьшении скорости роста давления водорода максимальный изгиб пластины сильно уменьшается.

Показано, что масштабы и кинетика формоизменения односторонне насыщаемой водородом палладиевой пластины регламентируется, с одной стороны, фундаментальными свойствами системы Pd-H, а с другой – особенностями внешних и внутренних условий, определяющих развитие процесса проникновения водорода в пластину [6-9]. В целом, при заданных внешних условиях взаимодействия водорода с палладиевой пластиной, именно работа этих внутренних физических процессов определяет особенности кинетики и масштабы изгиба пластины, а также развитие её последующего распрямления.

Цель (задачи) исследования

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы получить новую информацию о физических закономерностях проникновения водорода в металл вызывающих формоизменение стальных конструкций водородосодержащих производств. В связи с этим возникла задача создания новой экспериментальной установки, позволяющей изучать проникновение в сталь электрохимического водорода.

Основной материал исследования

Сталь – основной конструкционный материал, который часто подвергается насыщению водородом при его эксплуатации. Поэтому систематические исследования формоизменения стали под воздействием водорода, установление основных закономерностей этого явления в зависимости от параметров воздействия водорода является актуальной научной задачей.

Сталь – эндотермический окклюзер водорода и, соответственно, легко и много поглощает водород при высоких температурах. Однако, при низких температурах, стали можно легко насыщать водородом электролитическим методом, даже при относительно небольших плотностях катодного тока (0,01-1) А/см^2 , что эквивалентно насыщению металла из газовой фазы при давлениях в сотни и тысячи атмосфер [10].

В соответствии с формулированной задачей была спроектирована и изготовлена электрохимическая водородная установка (ЭВУ-5) для систематического экспериментального исследования при комнатной температуре индуцированного водородом формоизменения металлических объектов в виде пластины из нержавеющей стали, никеля и др. металлов и сплавов (рис. 1 и 2).

В последующем установлена закономерность индуцированного водородом изменения формы металлических пластин при комнатной температуре и различных плотностях тока. Далее предполагается разработать исходные физические данные для технологических режимов безопасной работы и эксплуатации аустенитных сталей

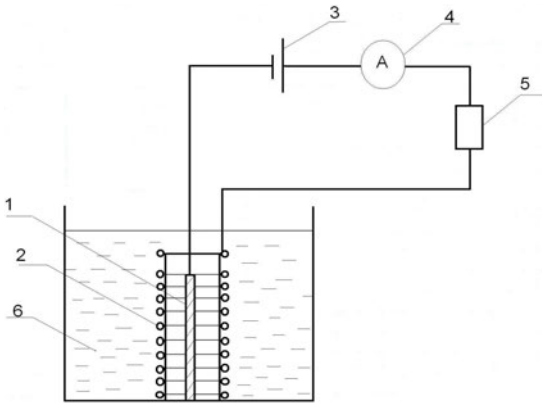


Рис. 1. Электрическая схема установки ЭВУ-5: *1* – катод (образец); *2* – анод (платиновая проволока); *3* – источник питания; *4* – амперметр; *5* – стабилизатор тока; *6* – электролит



Рис. 2. Блок электрохимического насыщения образцов

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

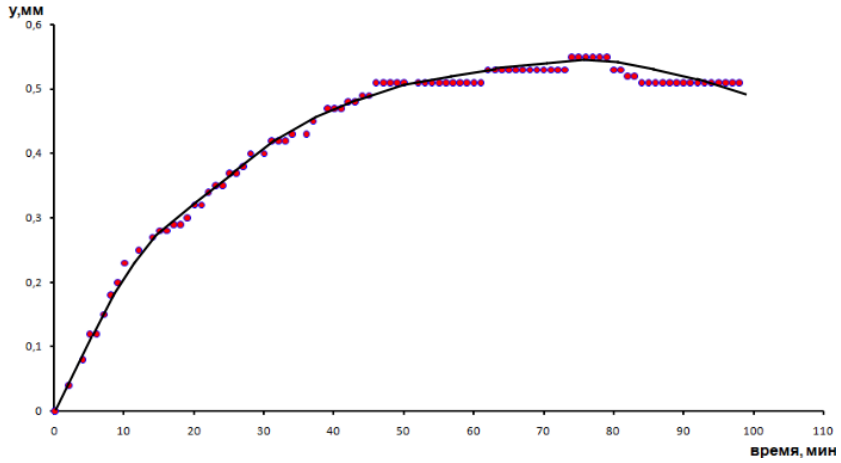


Рис. 3. Временная зависимость стрелы прогиба никелевой пластинки при ее одностороннем насыщении водородом при плотности тока 0,05 А/см^2

электрохимических и химических производств, а также мембранных сплавов для получения особо чистого водорода и его изотопов для атомной, водородной и термоядерной энергетики. Установленные экспериментально закономерности позволят понять «физику работы» внутренних водородных напряжений, отвечающих за надежность и работоспособность металла при его эксплуатации в контакте с водородом, его изотопами и водородосодержащими средами.

ЭВУ-5 состоит из ванны из органического стекла, катода и анода (рис. 1 и 2). Катод (исследуемый образец) в виде тонкой пластинки, изолированной с одной стороны, крепится нижним концом в зажиме. Другой конец образца – свободный, на него крепится удлинитель, который возвышается над уровнем электролита. Анод представляет собой платиновую проволоку, намотанную на держатели из керамических трубок, которые располагаются вокруг образца.

Для первых экспериментов использовали никелевые пластины толщиной 0,2 мм и длиной 50 мм. Образцы первоначально отжигали в вакууме при температуре 700 °С в течение одного часа и охлаждали с печью до комнатной температуры. После отжига одну сторону пластинки защищали от электрохимического воздействия, покрывая цапон-лаком. Вторую сторону обезжиривали сначала ацетоном, а затем спиртом.

Эксперименты по изучению формоизменения никелевой пластины были проведены по следующей схеме. Исследуемый образец нижним концом закрепляли вертикально в держателе электрохимического блока установки. После монтажа рабочая длина образца составляла 45 мм. К верхнему концу образца закрепляли пластинку-удлинитель, для регистрации стрелы прогиба. После этого смонтированный блок электрохимического насыщения помещали в установку – в ванну из органического стекла, которую заполняли электролитом: 4 %-ным раствором серной кислоты. Плотность тока составляла 0,05 А/см^2. Регистрацию изменений стрелы прогиба свободного конца образца вели с помощью видеокамеры. Полученную запись расшифровывали кадр за кадром и посекундно в компьютерных программах Sony Vegas и Pinnacle Studio. Построенная по результатам временная зависимость стрелы прогиба образца в процессе его одностороннего насыщения водородом представлена на рис. 3. Как видно из зависимости при одностороннем насыщении водородом никелевая пластинка претерпела закономерный изгиб. Стрела прогиба достигла своего максимального значения (y_{max}=0,55 мм) за 74 мин. Через 6 мин. после прекращения насыщения пластинка начала распрямляться, что связано с перераспределением водорода и уменьшением напряженного состояния пластины.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что разработанная ЭВУ-5 позволяет проводить систематическое изучение формоизменения металлических пластин под действием водорода при различных режимах наводороживания.

Список литературы

1. Згоденко Р.А. Обеспечения высокого качества термической обработки изделий в периодических печах с выкатным и стационарным подом / Металлургические процессы и оборудование. – 2006. – №3(5). – С. 12-15.
2. Goltsov V.A. Fundamentals of Hydrogen Treatment of Materials / Progress in Hydrogen Treatment of Materials. – Donetsk-Coral Gables: Kassiopeya Ltd., 2001. – P. 3-37.
3. Goltsov V.A., Glukhova Zh.L., Redko A.L. Hydrogen elasticity effect and its importance in

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

diffusion of concentration inhomogeneities in metals / Int. J Hydrogen Energy. – 1997. – Vol.22. – P. 179-183.
4. Goltsov V.A. Progress in Hydrogen Treatment of Materials. – Donetsk-Coral Gables: Kassiopeya Ltd., 2001 – P. 543.
5. Формоизменение палладиевой пластины под воздействием водорода / В.А. Гольцов [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 1990. – Т.10. – С.135-141.
6. Глухова Ж.Л., Любименко Е.Н., Гольцов В.А. Экспериментальное исследование индуцированного водородом формоизменения пластины из палладия и сплавов α-PdH_x / Физика и техника высоких давлений. – 2011. – Т.21, №3. – С.110-118.
7. Любименко Е.Н., Гольцова М.В. Закономерности формоизменения палладиевой пластины при ее одностороннем насыщении водородом / Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). – 2011. – С. 100-107.
8. Гольцова М.В., Любименко Е.Н. Особенности формирования градиентного сплава палладий – водород и формоизменение палладиевой пластины в процессе одностороннего насыщения водородом / Физика металлов и металловедение. – 2011. – Т.112, №4. – С. 393-403.
9. Гольцова М.В., Любименко Е.Н. Формоизменение палладиевой пластины при ее одностороннем насыщении водородом: влияние скорости роста давления газообразного водорода / Физика металлов и металловедение. – 2012. – Т.113, №11. – С. 1173-1179.
10. Наводороживание металла при электрохимических процессах / Под ред. С.М. Белоглазова. – Ленинград: Изд-во Ленинградского ун-та, 1974. – 200 с.

A.V. Vetchinov /Cand. Sci. (Phys. and Math.)/, T.A. Shchegoleva,
V.A. Goltsov /Dr. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

ELECTROCHEMICAL HYDROGEN PLANT FOR DEFORMATION STUDY OF METALS AND ALLOYS

Background. *The embedded hydrogen atoms cause an expansion of the crystal lattice of metal. Therefore, any concentration inhomogeneity of hydrogen, regardless of its cause, entails internal hydrogen stresses in solids. The macroscopic manifestation of the action of hydrogen stress is the deformation of metal samples during the hydrogen penetration. This should be considered when using the materials in contact with hydrogen.*

Materials and/or methods. *Steel is the main construction material, which is often subjected to saturation with hydrogen in its use (nuclear power and technology, petrochemical production, etc.). Steel readily absorbs hydrogen at high temperatures. However, at low temperatures, steel can be saturated with hydrogen by electrolytic method even at the relatively low cathode current densities of 0.01-1 A/cm^2, which is equivalent to saturation of metal from the gas phase at pressures of hundreds or thousands of atmospheres. The paper describes the designed and manufactured electrochemical hydrogen plant for a systematic experimental study at room temperature of the deformation of metal plates of stainless steel, nickel and other metals and alloys, induced by hydrogen. A nickel plate with a thickness of 0.2 mm and a length of 50 mm was used for the first experiments. The 4-percent solution of sulfuric acid was used as an electrolyte. The current density was 0.05 A/cm^2. One side of the sample was protected by varnish coating from the electrochemical effects that allowed for one-sided saturation with hydrogen.*

Results. *In the process of electrolytic saturation, the nickel plate has undergone a natural bend. The deflection has reached its maximum value of 0.55 mm in 74 min (time of saturation). 6 min after the saturation had stopped the plate began to straighten up, that was connected with redistribution of hydrogen and reduction of the stress state of the plate.*

Conclusion. *The obtained results show that the developed device allows the systematic studying of the deformation of metal plates in different modes of hydrogen saturation by the electrolytic method.*

Keywords*: hydrogen stress, deformation of plates, hydrogen elasticity.*

Статья поступила 05.05.2016 г.
© А.В. Ветчинов, Т.А. Щеголева, В.А. Гольцов, 2016
Рецензент д.т.н., проф. А.Б. Бирюков

УДК 621.771.06+621.892

Р.Р. Дема /к.т.н./, Р.Н. Амиров /к.т.н./, М.В. Харченко /к.т.н./, А.А. Харченко
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (Магнитогорск)
М.А. Леванцевич, Н.Н. Максимченко
Белорусский национальный технический университет (Минск)
А.Н. Белый
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (Минск)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СМАЗКИ НЕПРЕРЫВНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Выполнена оценка эффективности работы системы подачи технологической смазки, установленной на первых трех клетях №7-9, для всех клетей №7-13 чистовой группы непрерывного широкополосного стана горячей прокатки 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Проведен анализ влияния смазочного материала на основные технологические параметры процесса прокатки с последующим выводом уравнений регрессий, определяющих коэффициент «присутствия» смазочного материала в межвалковом контакте.

Ключевые слова: *горячая прокатка, смазочный материал, система подачи технологической смазки, энергосиловые параметры.*

Постановка проблемы

Одним из прогрессивных способов повышения эффективности процесса горячей прокатки является применение системы подачи технологической смазки (СТС), в частности, смонтированной на первых трех клетях чистовой группы №7-9 непрерывного широкополосного стана горячей прокатки (НШСГП) 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», особенностью которой является подача смазочного материала (СМ) на поверхности опорных валков со стороны выхода металла из клети. Установленные в процессе опытной эксплуатации указанной системы объемы подаваемого СМ являются сдерживающим ограничением возможностей СТС по достижению максимальных результатов, направленных на снижение энергосиловых и фрикционных параметров, применение которой ориентировано в большей степени на прокат с высоким классом прочности. В связи с этим, актуальной задачей является изучение и определение воздействующих параметров на эффективность работы СТС, а также оценка влияния СМ на изменение технологических параметров всей чистовой группы клетей (№7-13), а также НШСГП 2000.

Анализ последних исследований и публикаций

В работах [1-4] авторы отмечают, что использование СМ в производстве горячего проката качественно снижает энергосиловые параметры, повышает стойкость рабочих валков за счет уменьшения абразивного износа и сокращает случаи образования трещин разгара. Также авторы указанных работ наряду с этим едины во мнении о малоизученности вопроса применения СМ при производстве горячего проката. Проведен ряд работ по оценке влияния СМ на энергосиловые параметры [5-7], а также на износ прокатных валков [8,9] и зафиксировано снижение данных параметров в среднем на 10 %.

При эксплуатации СТС НШСГП 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», специалистами комбината было отмечено качественное влияние, выраженное в снижении загрузки приводов последующих клетей №10-13, но тем не менее исследований, направленных на изучения данного вопроса, не проводилось.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является качественная и количественная оценка влияния СМ на изменение параметров прокатки для последующих клетей №10-13 чистовой группы НШСГП 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Для достижения поставленной цели следует решить следующие задачи:

– провести экспериментальные исследования и оценку влияния СМ на энергосиловые пара-

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

метры для всей чистовой группы клетей НШСГП 2000;

– определить воздействующие факторы, влияющие на работу СТС для клетей №10-13, и получить уравнения регрессии, позволяющие описать характер изменения энергосиловых параметров процесса горячей прокатки с использованием СТС для клетей №10-13 НШСГП 2000.

Основной материал исследования

Количественная оценка влияния СМ на изменение энергосиловых параметров процессов горячей прокатки сводилась к сбору массива экспериментальных данных, в котором фиксировались такие параметры, как: удельный расход энергии (a, кВт·ч/т), усилие прокатки, (P, т), толщина (h, мм), ширина (B, мм), температура (T, °С), скорость прокатки (V_p, м/с), относительное обжатие (ε, %) и момент на валу главного привода ($M_{ов}$) при работающей и выключенной СТС. Исследованию было подвергнуто свыше 500 прокатанных полос различных марок стали со средневзвешенным профилем 2,7×1220 мм. Результаты экспериментальных исследований усилия прокатки для клетей №10-13, в зависимости от группы стали по выкатываемости согласно технологической инструкции, представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Проведя комплексную оценку эффективности СТС, следует отметить, что наблюдается косвенный эффект от применения СМ в клетях №7-9, выраженный в снижении параметров прокатки на последующих клетях №10-13 чистовой группы стана.

По мнению авторов, полученный результат можно объяснить следующим образом.

1. В результате адгезии на поверхности рабочих валков клетей №7-9 СМ попадает на полосу и выгорает. В результате чего образовавшиеся зольные осаждения оказывают влияние на снижение касательных напряжений трения в контакте рабочий валок-полоса в последующих клетях №10-13.

2. Поскольку СТС в настоящее время не интегрирована в автоматизированную систему управления технологического процесса прокатки на стане, то влияние СМ на изменение технологических параметров можно оценивать как возмущающий фактор, способствующий перенастройке стана.

Поэтому предполагается, что в результате выгорания СМ, образовавшиеся зольные осаждения оказывают влияние на снижение касательных напряжений трения в контакте рабочий валок-полоса в последующих клетях (№10-13). Однако детальное исследование данного вопроса не проводилось.

Для анализа изменения энергосиловых характеристик были вычислены описательные статистики их распределения для всей чистовой группы клетей НШСГП 2000, построены зависимости нормального распределения с помощью программного комплекса Statistica при горячей прокатке с применением СТС. Статистическая оценка влияющих параметров на изменение токовых характеристик процесса горячей прокатки определялась между значениями распределенной погонной нагрузки (P/L_0, МН/м), сопротивления деформации (σ_0, МПа), отношения диаметров (D_0/D_p) и отношения давлений (P''/P'):

$$k^{I(10)}{}_{см} = \frac{I''}{I'} = -0{,}257 + 1{,}03\left(\frac{P''}{L_0}\right) + 0{,}000036{\sigma_0}^2,$$

$$k^{I(11)}{}_{см} = \frac{I''}{I'} = -0{,}485 + 1{,}21\left(\frac{P''}{L_0}\right) + 0{,}0055{\sigma_0}^2,$$

$$k^{I(12)}{}_{см} = \frac{I''}{I'} = -0{,}49 + 0{,}132\left(\frac{P''}{P'}\right) + 0{,}75\left(\frac{D_{оп}}{D_{раб}}\right) - 0{,}065\left(\frac{D_{оп}}{D_{раб}}\right)^2 + 0{,}1\left(\frac{P''}{L_0}\right)^2,$$

$$k^{I(13)}{}_{см} = \frac{I''}{I'} = -0{,}08 + 0{,}145\left(\frac{P''}{P'}\right) +$$

Табл. 1. Изменение усилия прокатки для клетей №10…13 в соответствии с группами стали по выкатываемости

№ клети	1 группа σ_0=70-117 МПа		%	2 группа σ_0=73-100 МПа		%	3 группа σ_0=80-114 МПа		%	4 группа σ_0=79-153 МПа		%	5 группа σ_0=86-115 МПа		%
	СМ	без СМ		СМ	без СМ		СМ	без СМ		СМ	без СМ		СМ	без СМ	
10	1274	1311	2,8	1269	1354	6,3	925	1338	30	1249	1480	15	954	1269	24
11	1470	1475	0,3	1411	1441	2,1	1586	1936	18	1584	1822	13	1350	1497	9,8
12	1239	1290	3,9	1269	1360	6,7	925	1338	30	1249	1480	15	953	1079	11,6
13	971	1015	4,3	1015	1061	4,3	1005	1051	4	1055	1103	4	788	824	4,3

Примечание: σ_0 – сопротивление деформации.

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

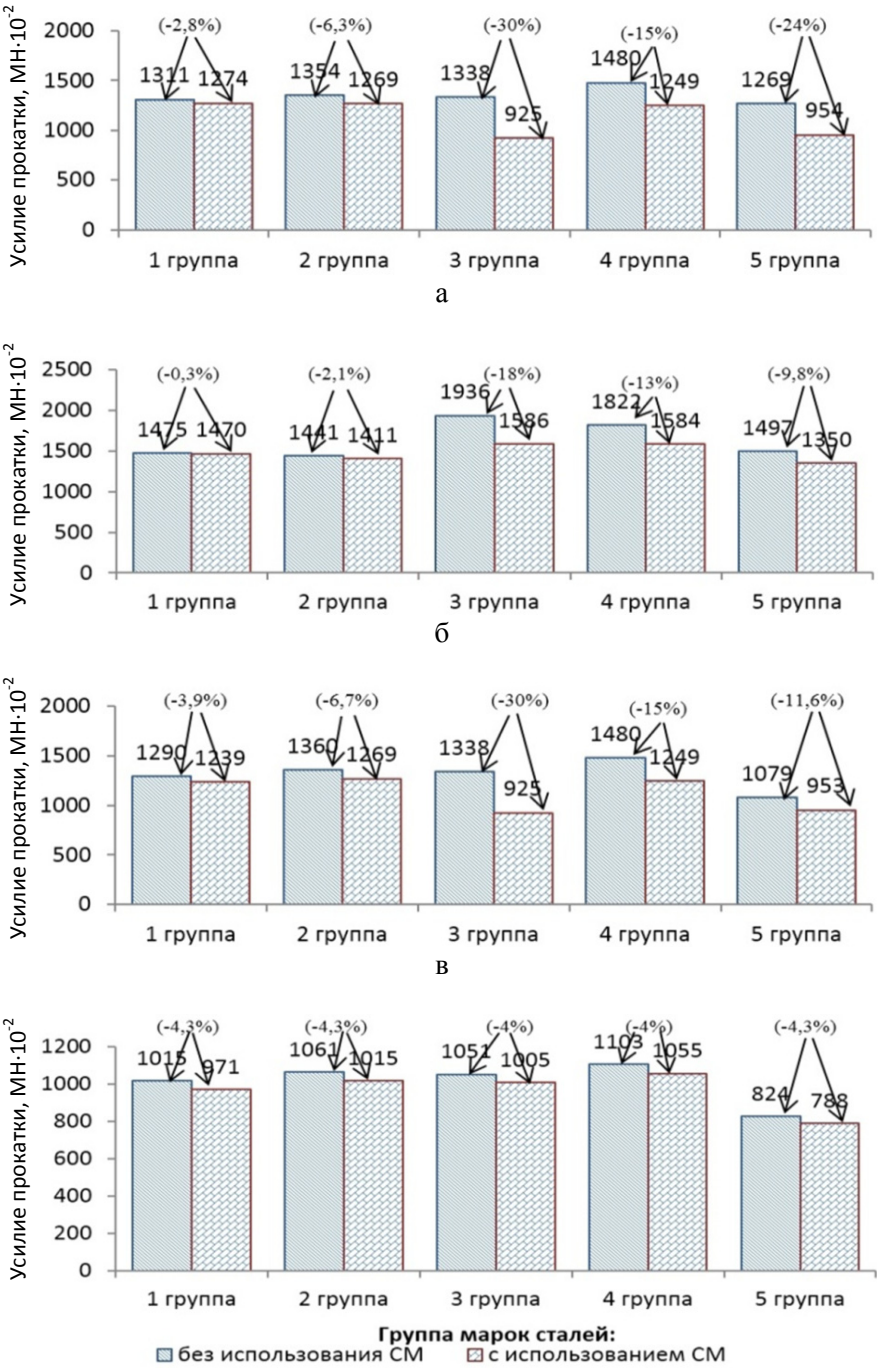


Рис. 1. Изменение усилия прокатки для клети №10 (*а*), 11 (*б*), 12 (*в*), 13 (*г*) в соответствии с группами стали по выкатываемости

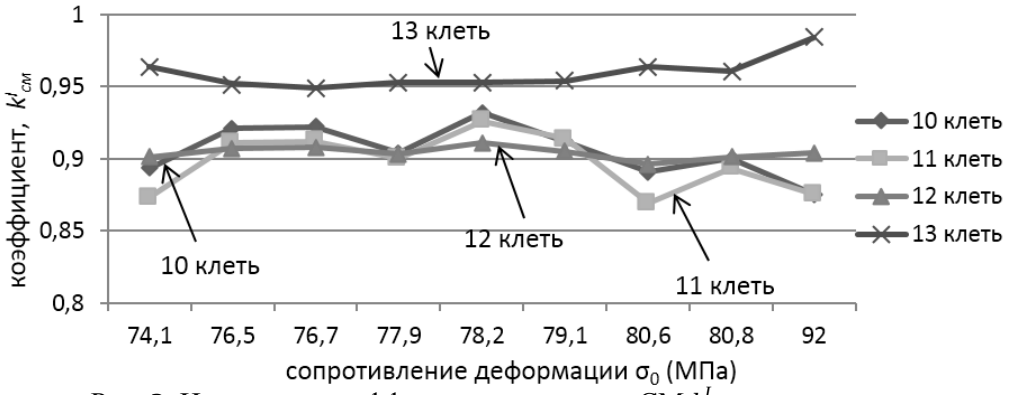


Рис. 2. Изменение коэффициентов влияния СМ $k^I_{см}$ в зависимости от сопротивления деформации σ_0 для клетей №10-13 НШСГП 2000

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

$$+2{,}11\left(\frac{P''}{L_0}\right)-2{,}46\left(\frac{P''}{L_0}\right)^2.$$

На основе корреляционно-статистического анализа выявления взаимосвязи между силой тока ($I_{дв10\text{-}13}$) и остальными технологическими параметрами был проведен множественный регрессионный анализ с последующим выводом уравнения регрессии с использованием предварительно подсчитанных коэффициентов, входящих в вышеприведенные уравнения. В результате получены численные значения коэффициентов в зависимости от сопротивления деформации [10] (рис. 2). Приведенные регрессионные зависимости отображают влияние СМ на изменение токовых характеристик процесса прокатки, влияющих на параметр момента на валу главного привода [3], который определялся по следующему условию для всей чистовой группы клетей НШСГП 2000 ОАО

$$M_{дв}^{см(i)}=\frac{N_{дв}^{(i)}}{\omega^{(i)}}k^{I(i)}{}_{см},$$

где $N_{дв}$ – мощность прокатки, Вт; ω – угловая скорость, рад/с; $k^{I(i)}{}_{см}$ – коэффициент влияния СМ на изменение токовых характеристик для i-ой клети стана.

Определение коэффициента и его использование в данного рода уравнениях, связанных с определением энергосиловых характеристик процесса, позволяет аналитически предвидеть изменение силовых характеристик.

Выводы

1. На основе корреляционно-статистического анализа определены воздействующие факторы, влияющие на работу СТС.

2. Получены численные значения коэффициентов влияния от присутствия СМ $k^{I}_{см}$ на энергосиловые характеристики НШСГП 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

3. Проведен множественный регрессионный анализ с выводом уравнения регрессии, позволяющим описать характер изменения ключевых энергосиловых характеристик процесса горячей прокатки с использованием СТС.

4. Комплексное рассмотрение выдвинутых заключений позволит, не прибегая к опытным испытаниям, аналитически решать вопросы, связанные с целесообразностью применения СТС, как одного из перспективных и эффективных способов повышающего энергоэффективность процесса производства горячего проката, снижая его энергосиловые характеристики, на различных НШСГП.

5. Применение СМ оказывает непосредственное влияние на снижение энергосиловых параметров в клетях №7-9. Кроме того, в клетях №10-13 чистовой группы НШСГП 2000 наблюдается косвенный эффект от влияния СМ, который подается на валки клетей №7-9.

Список литературы

1. Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.
2. Эмульсии и смазки при холодной прокатке / В.К. Белосевич [и др.]. – М.: Металлургия, 1976. – 416 с.
3. Дема Р.Р., Амиров Р.Н., Курбаков И.А. Влияние смазочного материала на изменение энергосиловых параметров непрерывной группы клетей стана 2000 горячей прокатки ОАО «ММК» / Сб. науч. тр. VII Межд. науч.-техн. конф. «Современные проблемы машиностроения». – Томск: Нац. исслед. Томский политехн. ун-т, 2013. – С. 288-292.
4. Чертавских А.К., Белосевич В.К. Трение и технологическая смазка при обработке металлов давлением. – М.: Металлургия, 1968. – 361 с.
5. Разработка модели прогнозирования энергосиловых параметров горячей прокатки при подаче смазочного материала на валки непрерывного широкополосного стана / С.И. Платов [и др.] // Производство проката. – 2014. – №4. – С. 3-9.
6. Комплексная оценка и исследование эффективности системы подачи технологической смазки в клетях №7-9 непрерывного широкополосного стана горячей прокатки 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» / С.В. Дубовский [и др.] // Производство проката. – 2011. – №12. – С. 6-8.
7. Влияние смазочного материала на изменение энергосиловых параметров прокатки в непрерывной группе клетей стана 2000 горячей прокатки ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» / С.И. Платов [и др.] // Производство проката. – 2013. – №11. – С. 9-14.
8. Математическая модель процесса изнашивания и прогнозирования срока службы рабочих валков клети кварто при подаче смазочного материала / С.И. Платов [и др.] // Производство проката. – 2012. – №9. – С. 38-44.
9. Математическое моделирование процесса изнашивания рабочих валков клети кварто при подаче смазочного материала / С.И. Платов [и др.] // Черные металлы. Спецвыпуск. – 2012. – С. 54-57.

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

10. Остапенко А.Л., Забира Л.А. Сопротивление деформации сталей при прокатке и методики его расчета / Черная металлургия. – 2009. – №3. – С. 54-79.

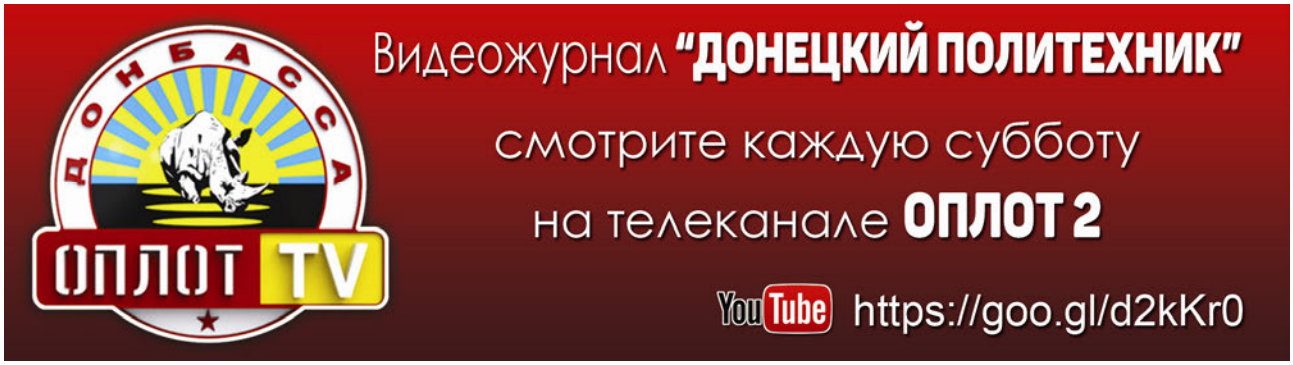
R.R. Dema /Sci. Cand. (Eng.)/, R.N. Amirov /Sci. Cand. (Eng.)/, M.V. Kharchenko /Sci. Cand. (Eng.)/, A.A. Kharchenko
Nosov Magnitogorsk State Technical University (Magnitogorsk)
M.A. Levantsevich, N.N. Maximchenko
Belarusian National Technical University (Minsk)
A.N. Belyj
Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus (Minsk)

DETERMINATION OF PARAMETERS INFLUENCING THE EFFICIENCY OF THE SUPPLY SYSTEM FOR TECHNOLOGICAL LUBRICATION IN CONTINUOUS WIDE HOT ROLLING MILLS

Background. *Application of supply systems for technological lubrication in the rolling production allows reducing the force of external friction on contact surfaces. It is known from the theory and practice that all the kinematic and power parameters of rolling to a certain extent depend on the forces of external friction. It is particularly important that with the reduced friction the pressure on the rolls and the power consumption are reduced too. The application of lubricating material allows producing steel grades with a high strength which are able to withstand high specific loads and work under harsh conditions.*
Materials and/or methods. *The statistical approach is used in the study to assess the impact of lubricant on the change in rolling parameters, for subsequent obtaining of regression equations for stands No. 10-13. The regression equations obtained in "Statistica" program allow determining the change in torque on the shaft of the main drive with the use of lubricant. The numerical values are determined for the coefficients of the lubricant influence on the change in the power parameters of rolling, depending on the steels group, classified by rolling out.*
Results. *The use of a lubricating material has a direct impact on reducing the power parameters in stands No. 7-9. In addition, in stands No. 10-13 of the finishing group of the continuous wide hot rolling mill (CWHRM) 2000, there is an indirect effect from the influence of the lubricant which is fed to the rolls of mill stands No. 7-9.*
Conclusion. *The comprehensive review of the put forward opinions will ensure, without the pilot testing, the analytical solving of the problems related to the feasibility of the supply system for the technological lubricant as one of the most promising and effective ways for improving the energy efficiency of the manufacturing process of hot rolled steel reducing its power characteristics on different CWHRM.*

Keywords: *hot rolling, lubricant, the supply system for technological lubrication, power parameters.*

Статья поступила 23.08.2013 г.
© Р.Р. Дема, Р.Н. Амиров, М.В. Харченко, А.А. Харченко М.А. Леванцевич, Н.Н. Максимченко, А.Н. Белый, 2016
Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронько



ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

УДК 621.78.08

А.Б. Бирюков /д.т.н./, П.А. Гнитиев
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА В КАМЕРНЫХ ПЕЧАХ ПРИ ЕГО ВОЗДУШНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Предложенная система предназначена для контроля в режиме реального времени тепловых потоков, отводимых из печи при воздушном охлаждении металла. Система основана на измерении температур и расхода воздуха на входе и выходе из печи. Использование данной системы позволяет повысить точность достижения заданного температурного состояния металла в результате выполнения операции воздушного охлаждения и избежать нерационального затягивания операции во времени. Положительными особенностями системы являются низкая стоимость используемых компонентов, высокая оперативность получаемых результатов и достаточная их точность, возможность задания граничных условий для параллельно работающей математической модели прогнозного управления.

Ключевые слова: *тепловое состояние, охлаждение металла, контроль темпа охлаждения.*

Постановка проблемы

На большинстве машиностроительных предприятий при производстве массивных металлических изделий на участке воздушного охлаждения (в цикле термической обработки) диагностика теплового состояния металла сводится лишь к измерению температуры газов в печи. Такой подход не дает возможности однозначно использовать информацию для управления технологическим процессом и является грубым при оценке значений температур металла. Актуальным вопросом является создание систем, способных поддерживать заданный темп охлаждения металла с целью повышения качества выпускаемой продукции. Создание автоматизированных систем тепловой диагностики металла в операциях воздушного охлаждения является современным подходом в решении задачи точного управления процессом.

Анализ последних исследований и публикаций

В металлургической и машиностроительной практике использование термической обработки позволяет управлять конечными свойствами и качеством производимой продукции в широком диапазоне [1]. Как известно, процесс термообработки включает в себя три основные операции:

– нагрев металла до требуемой температуры;

– выдержка металла при этой температуре для ее усреднения по толщине изделия;

– охлаждение металла.

В настоящее время благодаря применению современных газогорелочных устройств поддержание заданного и равномерного темпа нагрева является достижимой и достаточно простой задачей. Процесс выдержки зачастую осуществляется за счет уменьшения подачи газа в печь, либо прекращения его подачи, в зависимости от используемого типа футеровки. Что касается процесса охлаждения, то он является наименее контролируемым и менее изученным по ряду причин [2], хотя и является участком, в наибольшей мере влияющим на конечные свойства металла.

Так, например, в работе [3] предложен способ диагностики процесса нагрева металлов в печах, но для участка воздушного охлаждения он отсутствует.

Существует несколько различных способов охлаждения, отличающихся прежде всего скоростью проведения операции:

– медленное – в печи без подачи охлаждающих сред;

– нормальное – в потоке спокойного воздуха (нормализация);

– быстрое – в движущемся воздухе;

– резкое – в жидкостях (закалка).

Наименее исследованным является участок воздушного охлаждения металла в печи.

В работе [3] рассмотрены современные способы диагностики процесса тепловой обработки металла в печах с использованием достаточно дорогих преобразовательно-записывающих устройств для фиксации информации во время всего процесса термообработки. По опыту работы [4] можно сделать вывод о слабой изученности операции охлаждения в потоке движущегося воздуха. В настоящей работе авторами предлагается выбор коэффициента теплоотдачи из неко-

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

торого условного диапазона, что является не точным и вносит ряд погрешностей в расчет процесса охлаждения.

Исходя из практики проведения операции термообработки металла, можно сделать вывод о том, что оценка его теплового состояния на промышленных предприятиях на сегодняшний день производится с большой погрешностью. О температуре металла судят, пользуясь методом термограмм. При этом на поверхности и по толщине исследуемой эталонной садки размещаются термопары [5]. Недостатком такого способа является зависимость результатов каждого измерения от конкретного типа садки печи. В дальнейшем принимается, что измеренные параметры справедливы для подобных и близких по геометрическим и массовым параметрам садок, что является достаточно условным способом контроля теплового состояния металла. Важным параметром, влияющим на качество конечных изделий, является скорость охлаждения и точность поддержания заданного темпа охлаждения, а, следовательно, необходимо контролировать тепловой поток, отводимый от тел в каждый момент времени.

Проведенный аналитический обзор показал необходимость создания доступных, быстрых и точных систем диагностики теплового состояния металла при термической обработке как средства повышения качества производимой продукции.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является создание системы автоматического контроля и управления процессом воздушного охлаждения металла в камерных печах.

Основной материал исследования

Используя значение моментальных количеств теплоты, удаляемой из печи, а также привнесенной в печь с охлаждающим воздухом, можно составить дифференциальное уравнение первого порядка, которое представляет собой моментальный тепловой баланс печной камеры. При составлении данного уравнения принято, что температура газовой среды равномерна по объему печной камеры и равна значению температуры воздуха на выходе из печи $t_в$:

$$\frac{dt_в}{d\tau} = \frac{qF_м + V_в C^{t_{вн}} t_{вн} + Q_{вн\ пот} - V_в C^{t_в} t_в}{V_к C^{t_в}},$$

где q – плотность теплового потока от охлаждаемых тел к охлаждающему воздуху, Вт/м^2; $F_м$ – площадь охлаждаемых тел, м^2; $V_в$ – секундный расход воздуха для охлаждения изделий, м/с; $V_к$ – объем воздуха в камере печи, м^3; C – удельная теплоемкость воздуха при различных температурах, Дж/(м^3·К); $t_{вн}$ – начальная температура охлаждающего воздуха, °С; $Q_{вн.пот.}$ – текущее значение мощности теплопотерь, Вт; $t_в$ – температура воздуха, покидающего печь, °С.

Чтобы решить предлагаемое уравнение, необходимо в каждый момент времени располагать численным значением текущих теплопотерь $Q_{вн.пот.}$, которое, в свою очередь, может быть как больше, так и меньше нуля. Для снижения значений $Q_{вн.пот.}$ необходимо использовать низкоинерционные теплоизоляционные материалы, такие как керамоволокнистые блоки, характеризующиеся наиболее низкими значениями коэффициента теплопроводности и теплоемкости

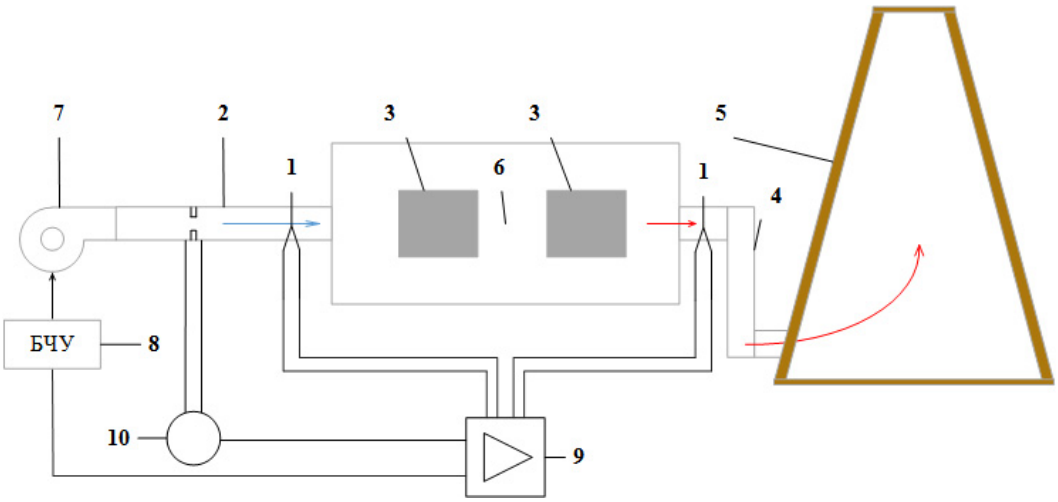


Рис. 1. Устройство системы диагностики теплового состояния металла:
1 – термопары для измерения температур воздуха; *2* – трубопровод охлаждающего воздуха; *3* – охлаждаемые изделия; *4* – трубопровод нагретого воздуха; *5* – дымовая труба; *6* – камера печи; *7* – вентилятор; *8* – блок частотного управления вентилятором; *9* – ПИД регулятор; *10* – датчик давления с цифровой обработкой сигнала

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org



Рис. 2. Стандартная модификация ТРМ151 для технологических процессов

среди доступных огнеупорных и теплоизоляционных материалов [6].

Неизвестной величиной в уравнении является плотность отводимого теплового потока, обеспечивающая поддержание заданной скорости охлаждения металла.

В качестве наглядной демонстрации реализации предлагаемой системы диагностики теплового состояния металла на рис. 1 приведено схематичное изображение цепи управления.

Система работает следующим образом: в регулятор 9 закладывают необходимую скорость охлаждения, которая, в свою очередь, определяет плотность отводимого теплового потока; регулятор в реальном времени отслеживает разность температур воздуха, поступающего в печь и выходящего из нее, при помощи термопар 1. Кроме того, регистрируются показания расхода воздуха от вентилятора при помощи преобразователя 10, и, по вышеприведенной зависимости, регулятор корректирует подачу воздуха для поддержания требуемого теплового потока путем воздействия на блок частотного управления вентилятора 8.

Для измерения температур воздуха рекомендуется применять хромель-алюмелевые термопары ТХА тип К, способные измерять температуры вплоть до 1370 °С.

В качестве регулятора рекомендуется использовать универсальный двухканальный программный ПИД-регулятор ОВЕН ТРМ151, в модификации 03 [7]: «Одноканальное пошаговое регулирование задвижкой с датчиком положения или без него» (рис. 2), что позволит анализировать температуру обеих термопар 1 с использованием обратной связи от датчика давления воздуха 10 в трубопроводах 2 и 4 с целью точного контроля расхода воздуха.

Для измерения расхода в подающем трубопроводе установлено сужающее устройство, до и после которого снимаются показания давления датчиком типа «Сафир М» с цифровой микропроцессорной обработкой сигнала модели 5120 с диапазоном измерения избыточного давления 2,5-40 кПа [8].

Следует отметить, что при помощи данной системы можно получить общее количество теплоты, удаляемой из печи, которое включает в себя теплоту, отданную металлом и теплоту, отданную футеровкой. На современных печах из плотной футеровки (шамотные огнеупоры) выполняется лишь подина, а стены и свод покрыты керамоволокнистыми блоками [9]. Для разделения количества отводимой теплоты по составляющим, параллельно с работой предлагаемой системы должна работать математическая модель прогнозного управления, основанная на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности как для металла, так и для футеровки. Задание граничных условий теплообмена и, соответственно, решение внешней задачи теплообмена производится путем задания значений коэффициентов теплоотдачи на основании экспериментально установленных критериальных зависимостей [10].

Для цилиндрических заготовок, обрабатываемых в печи, дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности, решаемое при реализации математической модели, записывается следующим образом:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c}\left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right),$$

где $\partial t/\partial \tau$ – скорость изменения температуры, К/с; λ, ρ, c – теплофизические характеристики металла: коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), плотность, кг/м^3, удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); r – координата, отсчитываемая вдоль радиус-вектора, м; φ – полярный угол, рад; z – продольная координата, отсчитываемая вдоль высоты, проведенной через центр основания цилиндра, м.

Переход от трехмерной постановки задачи к задаче меньшей размерности приводит к возникновению некоторой погрешности. Для призматических и цилиндрических тел она возникает за счет исключения из рассмотрения теплообмена на торцевых поверхностях. Зачастую эти погрешности не являются значительными, т.к. площадь торцевых поверхностей, как правило, существенно меньше площади боковой поверхности тел, а средняя плотность теплового потока для них обычно существенно меньше, чем для боковой поверхности.

Для двухмерной и одномерной постановок задачи исследуемой геометрической областью являются характерное поперечное сечение или выбранный отрезок соответственно.

Для изделий с круглым поперечным сечением влиянием торцевых поверхностей и изменением температуры, в зависимости от полярного

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

угла, можно пренебречь. Поэтому дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности записывается в одномерной постановке:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau}=\frac{\lambda}{\rho c}\left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial t}{\partial r}\right).$$

Для соответствия результатов решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности реальным условиям необходимо задание в математической модели условий однозначности:

– геометрические условия, учитывающие форму и размеры области пространства, для которой реализуется решение внутренней задачи;

– начальные условия, описывающие распределение температур в «нулевой» момент времени;

– граничные условия теплообмена, сформированные на основании особенностей внешней задачи теплообмена.

Геометрической областью каждого из рассматриваемых тел, для которой производится решение внутренней задачи, является цилиндр.

Для изучения процессов тепловой обработки материалов возможно использование двух вариантов начальных условий:

– задание усредненного температурного поля перед началом тепловой обработки: $0\le r\le r_з$, $\tau=0$:$t=t_н$; где $r_з$ – радиус заготовки, м; $t_н$ – начальная температура металла, °С.

– задание температурного поля, полученного в результате предыдущей тепловой операции над материалом, которое, в общем случае, является неравномерным: $0\le r\le r_з$, $\tau=0$: $t=t(r)$.

Граничные условия определяют теплообмен на поверхности области. Их задание основывается на учете качественных и количественных характеристик теплообменных процессов в изучаемой технологии.

Сущность теплотехнических процессов, протекающих при воздушном охлаждении металла в печи, заключается в одновременном протекании следующих видов теплообмена:

– конвективная передача тепла от поверхности изделий к охлаждающему воздуху;

– лучистый теплообмен между поверхностями изделий и футеровки;

– конвективная передача тепла от внутренней поверхности футеровки к охлаждающему воздуху.

Предлагается использование граничных условий третьего рода на поверхности расчетных сечений. В общем случае, в каждый следующий момент времени необходимо проводить пересмотр граничных условий.

Для круглого поперечного сечения и решения задачи в одномерной постановке задаем следующие граничные условия для каждого из рассматриваемых цилиндров:

$$\begin{cases} r=r_з:-\lambda\dfrac{\partial t}{\partial r}=\alpha_к^м(t_п-t_в^д)+ \\ +C_{клм}\left[\left(\dfrac{t_п+273}{100}\right)^4-\left(\dfrac{t_{пф}+273}{100}\right)^4\right], \\ r=0:\dfrac{\partial t}{\partial r}=0, \end{cases}$$

где $\alpha_к^м$ – коэффициент конвективной теплоотдачи от поверхности металла к охлаждающему воздуху, Вт/(м^2·К); $t_п$, $t_{пф}$ и $t_в^д$ – температуры поверхности металла, внутренней поверхности волокнистой футеровки и воздуха, натекающего струями на металл °С; $C_{клм}$ – приведенный коэффициент излучения в системе футеровка-металл, Вт/(м^2·К^4).

Поскольку газообразная среда, заполняющая печь, является лучепрозрачной, то для определения $C_{клм}$ используется следующая зависимость:

$$C_{клм}=\frac{1}{\dfrac{1}{\varepsilon_м C_0}+\left(\dfrac{1}{\varepsilon_{кл}C_0}-\dfrac{1}{C_0}\right)\dfrac{F_м}{F_{кл}}},$$

где $\varepsilon_м$ и $\varepsilon_{кл}$ – степень черноты металла и кладки соответственно; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, 5,67 Вт/(м^2·К^4); $F_м$ и $F_{кл}$ – площадь поверхности металла и кладки соответственно, м^2.

Для описания теплообмена между футеровкой и воздухом, футеровкой и металлом необходимо создание подмодели, описывающей тепловое состояние футеровки в рассматриваемой технологии.

Учитывая геометрические особенности футеровки каждой из поверхностей печи (толщина существенно меньше двух других геометрических размеров) (рис. 3) и предполагая равномерное распределение температуры по внутренней поверхности футеровки, записываем дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности в одномерной постановке в прямоугольной системе координат. В принципе, такой подход допустим и для печей с круглым поперечным сечением по причине незначительного отличия внутреннего и наружного диаметров ограждающей конструкции.

Начальные условия задаются следующим образом $0\le y\le S$, $\tau=0$:$t=t_н$.

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

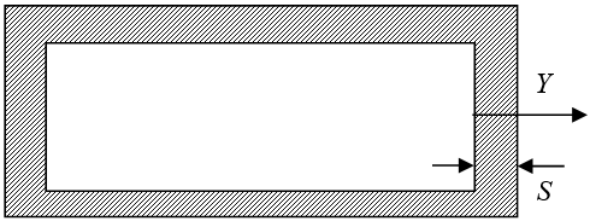


Рис. 3. Схема геометрических условий для подмодели теплового состояния футеровки: S – толщина огнеупора; Y – выбранное положительное направление на координатной оси

Граничные условия для внутренней и наружной поверхностей футеровки задаются как:

$$y = 0 : -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha_{ф}(t_{пф} - t_{в}) + C_{клм} \times$$

$$\times \left[\left(\frac{t_{пф} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{п} + 273}{100} \right)^4 \right] \frac{F_{м}}{F_{кл}},$$

$$y = S : -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha_{ос}(t_{нф} - t_{ос}),$$

где $t_{нф}$ и $t_{ос}$ – температуры наружной поверхности волокнистой футеровки и окружающей среды, °С; $\alpha_{ос}$ и $\alpha_{ф}$ – коэффициенты конвективной теплоотдачи от наружной поверхности футеровки в окружающую среду и от футеровки к воздуху в камере печи соответственно, Вт/(м^2·К).

Таким образом, итоговая математическая модель включает в себя два элемента: основной – для описания температурного поля изделий и вспомогательный – для изучения температурного состояния футеровки.

Особенностью такой математической модели является возможность учета взаимного теплообмена между различными частями футеровки, что позволяет с необходимой точностью определять доли отведенной теплоты от металла и от футеровки отдельно [11]. Детально математическая модель описана в работе [12].

Результатом работы системы в целом является возможность контролирования и регулирования удаляемого количества теплоты из печи с высокой точностью.

Такие системы автоматического контроля могут служить источником дополнительной информации для автоматизированных систем управления технологическим процессом [12], в системах прогнозного расчета теплового состояния металла, путем задания граничных условий II рода.

На практике часто возникает вопрос о необходимости интенсификации операции воздушного охлаждения металла в печах. Согласно литературным источникам, существуют различные способы интенсификации конвективного теплообмена (в частности, при охлаждении металла в печах), среди которых скоростная обдувка газовой средой, введение турбулизаторов, импульсные режимы подачи охлаждающей среды [13,14] и др. Предложенная система контроля и диагностики позволяет с большей точностью определять достигаемые при этом усредненные характеристики теплосъема.

Выводы

Предложена система контроля и диагностики теплового состояния металла при его воздушном охлаждении в камерных печах с использованием минимального количества дополнительных элементов. Источником информации для работы системы выступают температуры воздуха на входе и выходе из печи с учетом расхода охлаждающего воздуха. Преимущества предлагаемой системы при работе совместно с математической моделью заключаются в возможности определения с достаточной точностью температурного состояния металла, доступности и простоте реализации, возможности задания граничных условий II рода для математической модели. Система работает в условиях интенсификации конвективного теплообмена при охлаждении металла в печах путем подачи охлаждающей среды в импульсном режиме.

Список литературы

1. Фетисов Г.П., Карпман М.Г., Матюнин В.М. Материаловедение и технология металлов. – М.: Высш. шк., 2005. – 862 с.
2. Бирюков А.Б., Сафьянц С.М., Гнитиев П.А. Анализ современного состояния технологии воздушного охлаждения металла в печах / Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2014. – №11(1379). – С. 42-47.
3. Бирюков А.Б., Сафьянц С.М., Иванова А.А., Андриенко Е.Н. Современные подходы к диагностике процессов тепловой обработки металла в печах / Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2015. – №1. – С. 50-55.
4. Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е. Методики расчета нагревательных и термических печей: учебно-справочное пособие. – М.: Теплотехник, 2004. – 400 с.
5. Бирюков А.Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах. – Донецк: Ноулидж, 2012. – 248 с.
6. Мазур В.Л., Рябов А.И., Мазур В.В. Произ-

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

водственный опыт теплоизоляции высокотемпературных агрегатов в металлургии / Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. – №3. – С. 131-134.
7. Универсальный двухканальный программный ПИД-регулятор ОВЕН ТРМ151 – Модификации [Эл. ресурс] / ОВЕН - измерительные приборы, датчики, регуляторы. – Режим доступа: http://www.owen.ru/catalog/universal_nij_dvuhkanal_nij_programmnij_pid_regulyator_oven_trm151/86810059
8. «Сафир М». Датчики давления с цифровой обработкой сигнала [Эл. ресурс] / Комплексное решение задач измерения давления, расхода, уровня. Датчики давления «Сафір». Производство, продажа и обслуживание. – Режим доступа: http://www.manometr-kharkov.com/katalog/katalog%20SafirM%20microproc.pdf
9. Губинский В.И. Нагревательные печи металлургии – сегодня и завтра / Теория и практика металлургии. – 2004. – №6. – С. 56-60.
10. Бирюков А.Б., Гнитиев П.А. Исследование конвективного теплообмена в печах камерного типа / Проект Sworld. Межд. науч-практич. интернет-конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований», 18-30 марта 2014 г. – Иваново: Маркова АД, 2014. – С. 48-53.
11. Бирюков А.Б., Гнитиев П.А. Исследование механизма отвода тепла при воздушном охлаждении металла в камерных печах / Тепловые процессы в технике. – 2016. – №1. – С. 36-41.
12. Бирюков А.Б., Волошин А.И., Гнитиев П.А. Математическая модель для изучения процессов воздушного охлаждения металла в печах / Сталь. – 2015. – №7. – С. 78-81.
13. Convective heat transfer of unsteady pulsed flow in sinusoidal constricted tube / J. Batina [et al.] // Convection and Conduction Heat Transfer. – 2011. – P. 83-106.
14. Zohir A.E. The influence of pulsation on heat transfer in a heat exchanger for parallel and counter water flows / New York Science Journal. – 2011. – Issue 4(6). – P. 61-71.

A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.)/, P.A. Gnitiev
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE SYSTEM OF DIAGNOSTICS OF THE THERMAL STATE OF METAL IN CHAMBER FURNACES WITH AIR COOLING

Background. *Thermal processing is used in the production of large metal products in order to control the final properties and quality of products in the wide range. Crucially important is cooling, and therefore, it is necessary to maintain the predetermined cooling rate throughout the process. Of all cooling methods, air cooling is the least studied one, which causes some errors during the operation. This paper presents a system for control and diagnostics of the thermal state of the metal during its air cooling in chamber furnaces.*
Materials and/or methods*. The analysis of the temperature of air entering and being removed from the furnace, as well as the cooling air flow, is proposed in the paper. For the implementation of the considered system simple means to measure and control temperature and pressure are available. From the thermal balance, the incoming and being removed from the furnace heat, the desired cooling air flow is selected to provide the predetermined metal cooling rate.*
Results*. Based on the empirical research method, using the obtained parameters and the analysis of results with the help of a predictive control mathematical model working in parallel, the developed system allows to determine the current thermal state of the metal and the lining, as well as to maintain a predetermined flow of heat from the cooled metal.*
Conclusion. *The presented system with a small number of sensors allows operation of the air cooling in the heat treatment cycle with sufficient accuracy and using a mathematical model of predictive control it helps to maintain a predetermined heat flow from the metal taking into account the lining material.*

Keywords*: thermal state, metal cooling, cooling rate control.*

Статья поступила 28.01.2016 г.
© А.Б. Бирюков, П.А. Гнитиев, 2016
Рецензент д.т.н., проф. А.П. Ковалев

УДК 531.31.15.21+669

О.И. Павлиненко, Э.П. Левченко /к.т.н./, В.Г. Чебан /к.т.н./
ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет» (Алчевск)

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТАЛЬНОЙ КОЛОТОЙ ДРОБИ

Выполнен анализ возможности применения существующих конструкций дробилок и мельниц для получения стальной колотой дроби. Обосновано применение разгонно-ударной мельницы, использующей принцип «свободного удара», который позволяет свести к минимуму все энергоемкие процессы, связанные со смятием и уплотнением исходного материала, а также модернизация способа ударного раскалывания в шаровой мельнице.

Ключевые слова: *стальная дробь, дробилка, мельница, разрушение, твердость, крупность.*

Постановка проблемы

Стальная дробь стала применяться для очистки металлических поверхностей еще в середине XX века. Ее используют для очистки металла от ржавчины, окалины после термообработки, пригаров в литейной металлургии, а также от других загрязнений и технологических дефектов, которые могут отрицательно сказаться на дальнейшей обработке изделий.

В настоящее время почти все производство стальной колотой дроби основано на использовании шаровых мельниц.

Шаровые мельницы просты по конструкции и обеспечивают высокую надежность получения готового продукта необходимой крупности. Однако при их использовании происходит переизмельчение готового продукта, вследствие его многократного соударения в рабочей камере. Это повышает энергозатраты на производство колотой дроби. Таким образом, при приготовлении колотой дроби, возникает потребность в усовершенствовании существующего процесса раскалывания с целью повышения эффективности способа обработки.

Анализ последних исследований и публикаций

На сегодняшний день производство колотой стальной дроби, в своем большинстве, основано на использовании шаровых мельниц, хорошо зарекомендовавших себя в условиях данного производства с точки зрения надежности, простоты и безопасности труда [1]. Научные публикации, в которых бы уделялось внимание повышению эффективности такого оборудования, практически отсутствуют, хотя, по отзывам специалистов-практиков, существенное усовершенствование процесса раскалывания является очень актуальным. Особенности измельчения в шаровых мельницах характеризуются многократным ударным воздействием на сферическую дробь, пока она не претерпит разрушения с образованием частиц неправильной формы с острыми гранями. Обычно, в качестве измельчающих элементов используются шары диаметром 100 мм, в падающем режиме наносящие многократные удары по стальным сферическим частицам дроби диаметром от 1 до 6 мм. Однако такое взаимодействие существенно понижает долю раскалывания и увеличивает энергетические затраты из-за невозможности организации центрального удара в рабочем пространстве машины.

Некоторые направления изучения вопроса, изложенные в работах [2-4], касаются методов математического моделирования и экспериментальных исследований, однако в них не уделено внимания имеющемуся техническому многообразию различных способов и средств, используемых для разрушения частиц стальной дроби.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является анализ существующих дробилок и мельниц для реализации способов диспергирования материалов и на его основе оптимального варианта для производства стальной колотой дроби.

Основной материал исследования

Процессы разрушения различных материалов пристально изучаются учёными уже не одно столетие, но многие вопросы при этом до сих пор являются областью только эмпирических знаний и использования инженерных формул, т.к. математические модели этих процессов весьма сложны.

Под способом разрушения понимается вид воздействия разрушающей силы на материал.

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

Необходимые для разрушения усилия развиваются в измельчительных машинах, обеспечивающих преимущественное осуществление определённого способа.

Существует четкая зависимость между размером частицы и расходом энергии на ее разрушение, показывающая, что при процессе разрушения частиц затраты энергии увеличиваются с повышением требуемой степени измельчения, что является естественнонаучным пределом развития, преодолеваемым в эволюции дробильно-измельчительных машин.

В зависимости от назначения и принципа действия машин, предназначенных для измельчения материалов, используются следующие методы разрушения (рис. 1): раздавливание, истирание, изгиб, раскалывание, ударное воздействие («свободный удар») [5].

Машины для измельчения материалов должны иметь простую конструкцию, обеспечивающую удобство и безопасность обслуживания; минимальное число изнашивающихся, легко заменяемых деталей; предохранительные устройства, которые, при превышении допустимых нагрузок, должны разрушаться (распорные плиты, срезные болты и др.) или деформироваться (пружины), предотвращая поломки более сложных узлов. Их конструкции должны отвечать санитарно-гигиеническим нормам звукового давления, вибрации и запыленности воздуха [6].

Оценка результатов дробления (измельчения) производится по степени дробления (измельчения) и эффективности работы машин.

В зависимости от крупности исходного и дробленого материала различают следующие стадии дробления и измельчения, показатели которых приведены в табл. 1.

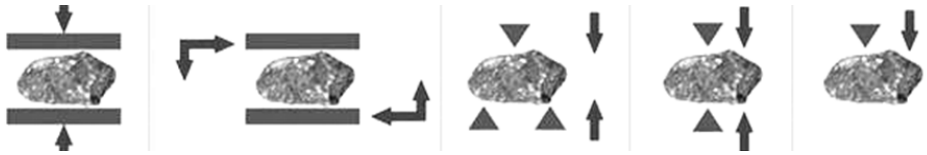
Способы разрушения материалов, реализуемые в дробилках и мельницах, приведены на рис. 2. Наиболее часто для дробления применяют щековые, конусные, валковые и молотковые дробилки. Одними из наиболее универсальных типов дробилок являются щековые.

Принцип действия щековой дробилки основан на разрушении кусков исходного материала за счет сжатия (раздавливания, раскалывания) и частично истирания между двумя массивными металлическими плитами (щеками) при их периодическом сближении. Одна из плит закрепляется неподвижно, другая перемещается, сдавливая и дробя поступающие куски (рис. 3а) [7].

Основными достоинствами щековых дробилок являются простота и надежность конструкции, компактность и легкость обслуживания. Кроме того, щековые дробилки подходят для измельчения пород любой твердости. Однако, например, при работе с твердыми материалами, в процессе эксплуатации происходит быстрое изнашивание подвижной «щеки». В целях экономии, плиты периодически меняют местами, что обеспечивает их равномерный износ. А для увеличения срока службы дробящих элементов используют наплавку твердыми материалами.

Таким образом, основным недостатком использования щековой дробилки для раскалывания стальной дроби является необходимость применения очень твердых футеровочных плит и создания больших усилий, что приводит к частым профилактическим и ремонтным работам и возникновению простоев оборудования.

В валковой дробилке исходный материал сдавливается между двумя валками, выполненными из твердого материала и вращающихся навстречу друг другу (иногда валки вращаются с разной частотой и тогда раздавливание материала сочетается с истиранием), что исключает пе-



а б в г д

Рис. 1. Схема основных способов механического измельчения:
а – раздавливание; *б* – истирание; *в* – изгиб; *г* – раскалывание; *д* – свободный удар

Табл. 1. Стадии дробления и измельчения

Стадия		Крупность, мм		Степень дробления
		«питания»	продукта	
Дробление	крупное	1200-500	350-100	3-5
	среднее	350-100	100-40	3-8
	мелкое	100-40	40-10	3-8
Измельчение	грубое	30-10	5-2	–
	тонкое	5-2	1-0,5	–
	сверхтонкое	1-0,5	0,1-0,005	–

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

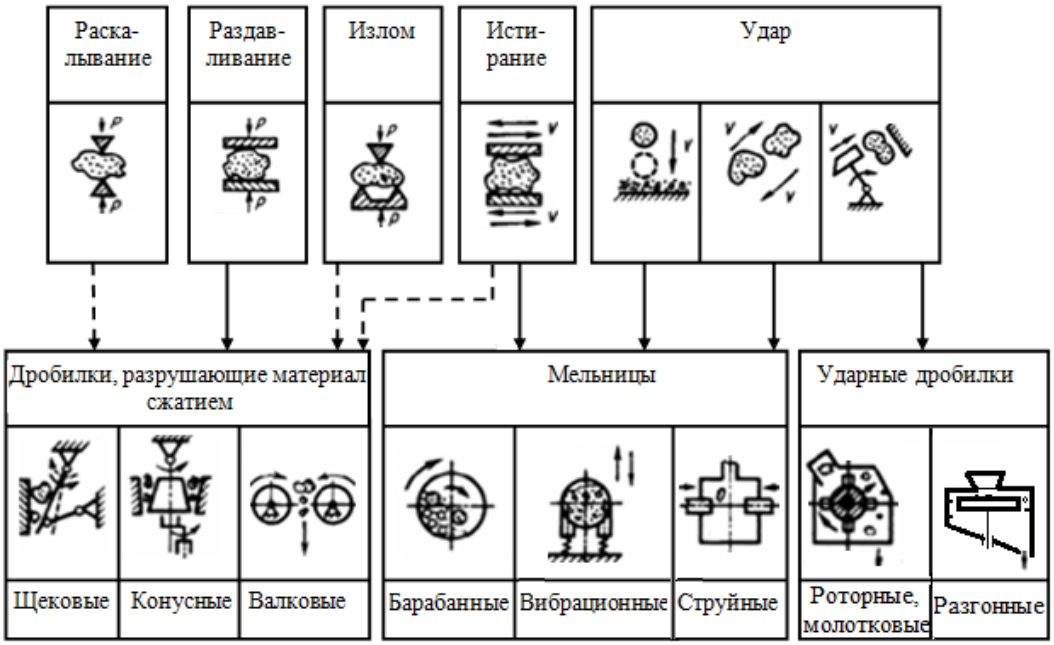
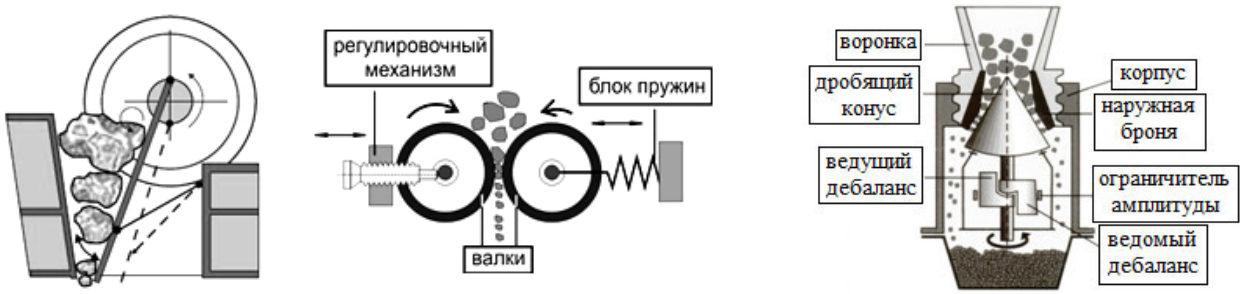


Рис. 2. Способы разрушения материалов, реализуемые в дробилках и мельницах: «–» – преобладающие; «– –» – сопутствующие



а б в

Рис. 3. Машины, разрушающие материал сжатием: *а б* и *в* – щековая, конусная и валковая дробилка

реизмельчение (рис. 3б). При попадании недробимых предметов пружины под действием возрастающей нагрузки сжимаются, в результате чего увеличивается зазор между валками и недробимый предмет выпадает из дробилки. Под действием пружин подшипники с валком возвращаются в исходное положение [7].

Для правильной эксплуатации валковых дробилок необходима непрерывная и равномерная подача дробимого материала по всей длине валка. Дробящие валки могут быть гладкими, рифлеными либо зубчатыми. Зубчатые валки обеспечивают лучший захват более крупных кусков руды или породы, а также более эффективное раскалывание кусков горной массы. Гладкие валки осуществляют дробление преимущественно раздавливанием.

К основным достоинствам этих дробилок следует отнести простоту конструкции, удобство ремонта и обслуживания, меньшее переизмельчение материала, более низкий удельный расход электроэнергии по сравнению с дробилками других типов. Недостатком валковых дробилок является то, что при неравномерной загрузке возможен перекос валков, а также они могут пропускать недробимые предметы.

Валковые дробилки обычно используют при дроблении некрепких материалов, таких как известняк, мергель, мел, уголь, глинистый сланец, шлак, полевой шпат, а также для измельчения вязких и влажных материалов, например, глин. Исходным материалом в наших условиях является стальная дробь твердостью 473 HV (по Виккерсу) или 46.9 HRB (по Роквеллу) [2], поэтому использование валковой дробилки для раскалывания стальной дроби нецелесообразно, т.к. им свойственны недоставки качества футеровки, как и у щековых дробилок, когда закаленная стальная дробь впивается внутрь рабочих органов, приводя к их разрушению и сводя на нет сам процесс раскалывания. Поэтому для качественной их работы нужны очень твердые материалы рабочих органов, что тяжело осуществимо на практике и требует высокой культуры

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

производства от поставщиков запасных частей.

Валковые дробилки используются, в основном, для мелкого или среднего дробления, но исходя из данных табл. 1, для получения стальной колотой дроби крупностью 0,075…2,8 мм из стальной сферической (литой) дроби крупностью 0,125…4,75 мм предпочтительно применение тонкого и сверхтонкого измельчения [2].

В конусных дробилках материал разрушается в процессе раздавливания, излома и частичного истирания между двумя коническими поверхностями (дробящим конусом и броней). Конструкция конусных дробилок представляет собой конусообразное загрузочное устройство, частично перекрытое дробящим конусом (рис. 3в). Исходное сырье поступает в питающий бункер дробилки, откуда через воронку перемещается в рабочую зону. Подвижный дробящий конус вращается вокруг продольной оси эксцентрично по отношению к броне, осуществляя непрерывное дробление материала.

Достоинствами конусной дробилки является ее высокая производительность и непрерывный цикл воздействия на дробимый материал, компактность, надежность и простота эксплуатации. Основным недостатком дробилок такого типа является повышенная энергоемкость технологии дробления. Кроме того, конструкция сама по себе довольно емкая и громоздкая, что в некоторых случаях затрудняет её эксплуатацию. Т.к. принцип работы основан на раздавливании, то требования к твердой и качественной броневой футеровке здесь тоже сохраняется в полной мере.

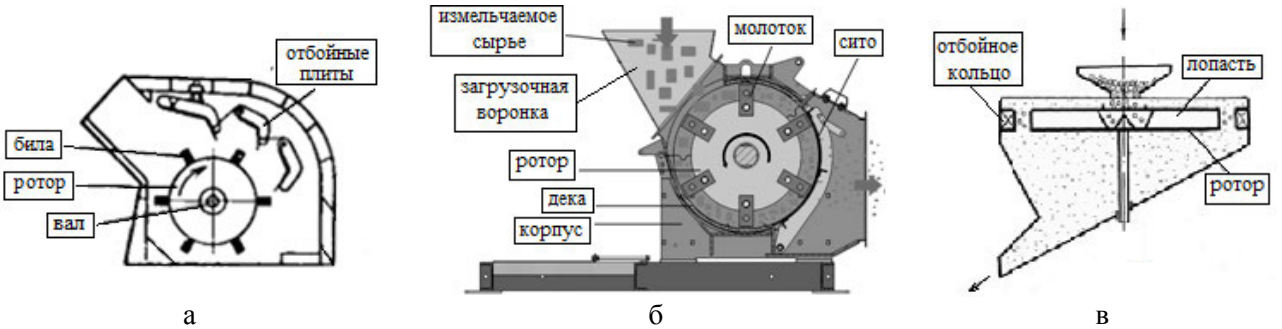
В измельчающих машинах ударного действия разрушение дробимого материала происходит за счет кинетической энергии движущихся масс. К ним относятся мельницы и два типа дробилок: молотковые и роторные [8].

Дробилки роторного типа применяются для измельчения материалов низкой или средней твердости. Использование роторных дробилок ограничено невозможностью регулировки крупности частиц в получаемом продукте. Они могут использоваться для производства мелких фракций.

При высокоскоростном вращении горизонтально расположенного вала куски измельчаемой породы многократно соударяются с прикрепленными к массивному ротору билами, прочными отбойными плитами, а также между собой. В результате удается достигнуть высокой степени измельчения (рис. 4а).

Достоинством роторной дробилки является то, что она отличается простотой конструкции, надежностью в эксплуатации, мобильностью за счет небольшого веса, относительно низкой ценой и высокой ремонтопригодностью. К недостаткам дробилки относятся низкая регулируемость размера фракций при дроблении рудных материалов и возникающие проблемы при дроблении твердых рудных пород. Била подвергаются большим нагрузкам и быстро изнашиваются. Также достаточно быстро изнашиваются отражательные плиты. Эти работы относятся к текущему ремонту дробилок. Замена ротора – сложная ремонтная операция, производимая на заводах-изготовителях. Она относится к капитальному ремонту, стоимость которого сопоставима со стоимостью новой роторной дробилки. Кроме того, при разрушении стальной дроби при низких скоростях вращения и мягких материалах рабочих поверхностей наблюдается эффект упругого отражения частиц дроби, приводящий к катастрофически быстрому их износу. Таким образом, единственная проблема дробилок роторного типа – это дороговизна ее эксплуатации.

В молотковых дробилках материал измельчается в основном ударом шарнирно подвешенных молотков, а также истиранием. Процесс работы заключается в следующем. Измельчаемый материал подаётся в дробилку через загрузочное отверстие и с помощью посредством питателя попадает на быстровращающийся ротор, где подвергается ударам молотков. Разрушение происходит за счёт многократных ударов по материалу молотков, а также осколков об отбойные элементы (деку и колосниковую решётку).



а б в

Рис. 4. Дробилки ударного действия:
а, *б* и *в* – роторного, молоткового и разгонного типа

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

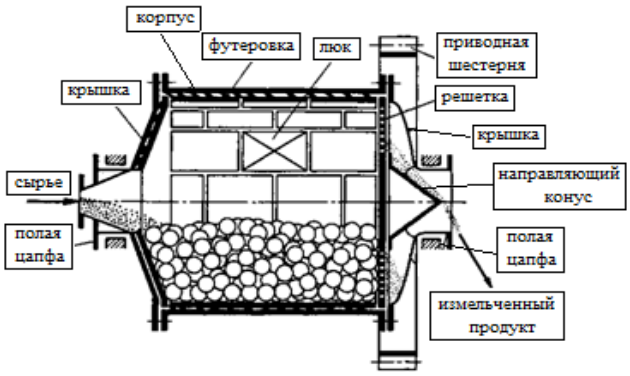


Рис. 5. Шаровая мельница

В случае попадания недробимого предмета в машину молотки отклоняются при контакте с ним от своего радиального положения относительно центра вращения, а затем снова занимают исходное состояние под действием центробежной силы. Готовый продукт выводится через выгрузочное приспособление. Наличие калибровочного сита позволяет получить готовый продукт гарантированной крупности, что является необходимым условием его качества (рис. 4б).

По своему назначению, конструктивным особенностям и принципу действия дробилки этого типа бывают:

– молотковые обычные, предназначенные для дробления всех видов хрупких материалов небольшой влажности;

– молотковые самоочищающиеся, предназначенные для дробления пластичных и сильнопылящих материалов, образующих с повышением влажности пластичную, липкую массу.

Недостатком молотковых машин является то, что в связи с многократным воздействием ударной нагрузки на измельчаемый материал, ими потребляется лишняя энергия, затрачиваемая на переизмельчение, а при раскалывании стальной дроби они, так же как и роторные, требуют увеличения частоты вращения ротора и высокой твердости рабочих органов.

Роторные машины не нашли такого широкого применения как молотковые дробилки.

В молотковых дробилках имеет место нецентральный удар, разрушение материала происходит за счёт большого количества ударов, а поэтому энергия расходуется непроизводительно. Целесообразно добиться измельчения частицы одним сильным центральным ударом, «свободным ударом» до требуемой степени измельчения. Для этого возможно осуществить процесс, обратный процессу в молотковой дробилке, т.е. оставить измельчающие органы неподвижными, а скорость сообщить частицам дроби.

Отличительной особенностью «свободного удара» является максимальная простота реализации при сравнительно низких энергозатратах. Термин «свободный удар» определяется как «удар на лету». В соответствии с этим, разрушение материалов представляет собой диспергирование материала в результате соударения с движущимся ударником (билом) или неподвижной преградой [3].

Изложенные обстоятельства позволяют считать вполне закономерным одно из преимуществ способа разрушения свободным ударом – его низкую удельную энергоёмкость. Измельчительные установки, реализующие этот способ, имеют (при равной производительности) меньшую установленную мощность. Это объясняется в первую очередь тем, что при свободном ударе сводятся к минимуму все контактные (более энергоёмкие) явления, связанные со смятием и уплотнением материала в приконтактной зоне. Для реализации этого принципа хорошо подходит центробежная дробилка, содержащая корпус, в котором на вертикальном валу с возможностью вращения установлен горизонтальный ротор. Наибольшее распространение получила конструкция центробежно-ударной дробилки (рис. 4в).

Основными недостатками центробежно-ударной дробилки являются: большое количество пыли в готовом продукте и сравнительно быстрый износ ударных тел при дроблении или измельчении материалов средней твердости или наличии твердых частиц в мягких материалах. При разрушении стальной дроби сохраняются требования к высокому качеству рабочих органов машины и большой скорости выброса частиц.

Преимуществами ударно-центробежных машин являются: компактность – высокая производительность на единицу объема машины, простота конструкции, надежность работы и малая затрата энергии на холостом ходу. Кроме того, благодаря тому, что практически вся подводимая к дробилке энергия используется для сообщения кинетической энергии измельчаемому материалу, центробежно-ударные дробилки имеют большой коэффициент полезного действия и высокий коэффициент измельчения.

Что касается струйных мельниц, то их основная сложность состоит в выделении готового продукта из газа. Фактически обвязка мельницы (конструкции по выделению материала из газа – воздуховоды, циклоны, классификаторы, бункера, фильтры и т.д.) на порядок по объему превосходит саму мельницу, значительно увеличивая стоимость всего решения. Кроме того, производительность разработанных конструкций достаточно невысокая.

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

Основным недостатком вибрационных мельниц является зависимость крупности кусков питания от размера шаров и амплитуды колебаний мельницы. Обычно размер куска не должен быть больше 0,1 диаметра шара. Приходится делать многостадийный помол, уменьшая размеры шаров на каждой стадии по мере снижения крупности продукта, что значительно усложняет процесс обработки. Кроме того, конструкция мельницы имеет особые требования в отношении надежности, определяемые ее работой в быстроходном энергонагруженном вибрационном режиме. Таким образом, при создании вибромельниц существует необходимость решения ряда технических задач, что значительно затрудняет ее применение для производства колотой дроби.

Барабанные мельницы позволяют производить грубый, средний и тонкий помол твердых, сыпучих материалов. Барабанные мельницы – машины измельчения истирающего и ударного действия.

Существуют две разновидности этого типа мельниц: шаровые и стержневые (трубные). Они различаются отношением длины к диаметру. У трубных барабанных мельниц отношение длины к диаметру составляет от 3:1 до 6:1, а у шаровых 2:1. Расход энергии на одну тонну продукта составляет 35-50 кВт·ч, а расход легированной стали в виде продуктов износа мелющих тел и футерующих элементов – до 1 кг и более [4].

Частицы подвергаются ударным нагрузкам находясь между движущимися мелющими телами, причем взаимодействие мелющих тел определяется как центральным ударом, так и взаимодействием, близким к касательному. Имеет место также истирание материала между слоями мелющей загрузки.

Принципиальной особенностью шаровых мельниц является использование в качестве рабочих органов свободных мелющих тел – шаров (рис. 5). Достоинством шаровых мельниц, как упоминалось выше, является их высокий уровень мощности и надежности, простота устройства и условий эксплуатации.

Несмотря на существенные достоинства, эти мельницы имеют и ряд недостатков, к которым относятся низкий выход готовой продукции и необходимость многократного пропуска через дробилку исходного материала, что приводит к его переизмельчению. Таким образом, стальная дробь в первоначальный момент диспергирования раскалывается очень не эффективно из-за преимущественно касательных ударов с шарами, пока она имеет круглую форму, а затем резко возрастает количество переизмельченного металлического порошка.

Для компенсации относительно слабого ударного и истирающего воздействия мелющих тел на обрабатываемый материал и соответственного повышения практической производительности шаровых барабанных мельниц приходится увеличивать объем их барабана, что приводит к значительному увеличению материалоемкости и энергонагруженности оборудования.

Большая часть энергии при работе шаровых мельниц теряется бесполезно, коэффициент полезного действия низок – по разным оценкам от 2 до 20 %.

Также необходимо учитывать, что даже при значительном увеличении объема барабана и соответственно габаритных размеров мельницы коэффициент заполнения мелющими телами обычно не превышает 0,35-0,4. Еще одним недостатком работы шаровых мельниц является сильный шум, который негативно влияет на состояние здоровья рабочего персонала.

Для повышения вероятности реализации центрального удара целесообразно вместо шаровой мелющей загрузки использовать стержни длиной примерно равной длине барабана или короткие цилиндры (цильпебсы). В таком случае, в продольном направлении создание рикошета исключается. Еще более эффективным представляется применение вместо шаров многогранников, имеющих плоские грани, что значительно улучшит контактные взаимодействия. Однако в данном случае возникает техническая задача налаживания производства мелющих тел такой формы, что пока является проблематичным.

Выводы

1. Несмотря на широкое распространение, надежность и неприхотливость, шаровые барабанные мельницы не в полной мере отвечают концепции развития современного технологического оборудования и требуют доработки способа измельчения, например, за счет применения в качестве мелющей загрузки многогранников вместо шаров.

2. Наиболее эффективным и перспективным техническим средством для получения стальной колотой дроби является центробежно-ударная разгонная дробилка, использующая принцип «свободного удара», который позволяет свести к минимуму все энергоемкие процессы, связанные со смятием и уплотнением исходного материала.

3. Центробежно-ударная дробилка имеет высокую производительность, большой коэффициент полезного действия, высокий коэффициент измельчения, и, самое главное, малую затрату энергии на холостой ход машины.

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

Список литературы
1. Производство стальной литой термообработанной дроби в условиях машиностроительных предприятий: монография / П.С. Гурченко [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2014. – 113 с.
2. Павлиненко О.И., Кучеренко Д.В., Левченко Э.П. Основные направления экономии электроэнергии в производстве стальной колотой дроби / Сб. науч. тр. 6-й науч.-практ. конф. асп. и студ. ДонГТУ и школьников «Экологические проблемы региона», Алчевск, 30 января 2016 г. – Алчевск: ВУО МАНЭБ, 2016. – С. 9-13.
3. Построение экспериментальных моделей физических процессов в дробильно-измельчительных устройствах / Э.П. Левченко [и др.] // Сб. мат. межд. заоч. науч.-практ. конф., Биробиджан, 15 декабря 2015 г. В 2-х ч. Ч.2. – Биробиджан: ИЦ им. Шолом-Алейхема, 2016. – С. 90-94.
4. Особенности математического моделирования механических процессов металлургических машин / Э.П. Левченко [и др.] // Современные проблемы теории машин**.** НОЦ «МС». – Норт-Чарлстон: CreateSpace. – 2016. – №4(1). – С. 14-16.
5. Андреев Е.Е., Тихонов О.Н. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению. – СПб: [б.и.], 2007. – 439 с.
6. Перов В.А., Андреев Е.Е., Биленко В.Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых: учеб. пос. для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 2007. – 301 с.
7. Борщев В.Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы: учеб. пос. – Тамбов: Изд-во Тамбовского техн. унив., 2004. – 75 с.
8. Мартынов В.Д., Алешин Н.И., Морозов Б.П. Строительные машины и монтажное оборудование. – М.: Машиностроение, 2004. – 351 с.

O.I. Pavlinenko, E.P. Levchenko /Cand. Sci. (Eng.)/, V.G. Cheban /Cand. Sci. (Eng.)/
Donbas State Technical University (Alchevsk)

THE ANALYSIS OF POSSIBILITY OF USING THE EXISTING TECHNICAL MEANS TO OBTAIN THE STEEL CHIPPED FRACTION

Background*. The analysis of machines for materials crushing and grinding and the ways of destruction implemented in them showed that high-speed centrifugal impact grinders of accelerating action type and the ball mills are the most preferable to obtain the steel chipped fraction if the central impact is the priority in them.*

Materials and/or methods. *Comparative analysis of various types of crushing machines is carried out regarding the possibility of crushing steel chipped faction. Evaluation of the effectiveness of considered options of use of crushing and grinding machines was performed via analytical comparison of the ways of applying loads on the material combined with the advantages and disadvantages of the types of machines which showed a preferred use of centrifugal impact grinders and ball mills for the formation of the chipped fraction.*

Results. *Along with the use of free direct strike, which is implemented in centrifugal impact mills of the accelerating action type, the new concept of increasing efficiency of drum mills used for the preparation of chipped fractions, with grinding bodies in the form of polyhedra with flat sides having correct or incorrect form. This will increase the probability of a direct collision of the grinding bodies with round fractions in the working space of these machines and eliminate harmful, from the point of view of the irrational use of energy, ricochets leading to the dispersion of energy in the form of useless heat release.*

Conclusion. *Based on the analysis of various types of machinery for crushing and grinding of materials identified the most efficient designs for efficient crushing of steel fraction in the form of centrifugal impact mills and drum mills with grinding bodies in the form of polyhedra with flat sides, which allows to achieve the implementation of direct impact in the working space of these machines.*

Keywords: *steel fraction, grinder, mill, fracture, hardness, particle size.*

Статья поступила 23.08.2016 г.
© О.И. Павлиненко, Э.П. Левченко, В.Г. Чебан, 2016
Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронько

УДК 621.967.1

В.Н. Ульяницкий /к.т.н./, П.А. Петров
ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет» (Алчевск)

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ И РАСПОЛОЖЕНИЯ СОРТОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА НА ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЗКИ ФАСОННЫМИ НОЖАМИ

Выполнен анализ влияния формы разрезаемого сечения и относительного направления движения инструмента на затрачиваемую работу при резке сложнопрофильного металлопроката и простых сортовых заготовок фасонными ножами.

Ключевые слова: *сортовой металлопрокат, фасонные ножи, сортовые ножницы, сила резки, работа резки, квадрат, круг, швеллер, полоса, штрипс.*

Постановка проблемы

Разделительные операции, как элемент технологической цепи производства сортового металлопроката, являются весьма распространенными и необходимыми в современном прокатном производстве. Многообразие механических схем резки усложняет выбор наиболее рационального способа разделения и требует учета влияния технологических факторов и проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований. В связи с этим, к качеству, производительности и энергоэффективности процесса резки предъявляют особые требования [1,2].

Анализ последних исследований и публикаций

Современное развитие теории, технологии и оборудования в области разделения сортового проката связано с работами таких исследователей, как А.И. Целиков, Ю.М. Стахиев, В.В. Татарников, А.А. Ищенко, В.М. Гребеник, С.А. Серегин, В.Т. Мещерин, С.С. Соловцов. По способу разделения исходного металла на мерные заготовки операции разделения можно классифицировать на два типа: безотходные и с отходами [3]. Доказано, что способы резки, исключающие стружкообразование (например, с помощью ножниц), характеризуются высокими материалосберегающими, экономичными показателями и увеличенной производительностью [4,5]. Однако широкое промышленное применение последних сдерживает необходимость изготовления профилированных ножей в соответствии с ассортиментом разрезаемых ножницами заготовок и выбором относительного направления движения инструмента. Некоторые варианты конструкторских решений по данным вопросам представлены в работах [6,7]. Определение энергосиловых параметров процесса резки фасонными ножами фланцевых профилей (или квадрата по диагонали) предложено проводить по традиционным методикам, разработанным для ножниц с параллельными ножами [8], что вносит определенную погрешность в оценку энергоэффективности разделительной операции, основными показателями которой являются сила и работа резки. В свою очередь, в исследованиях [9], на основании разработанного метода [10], учитывающего реальную геометрию профиля и

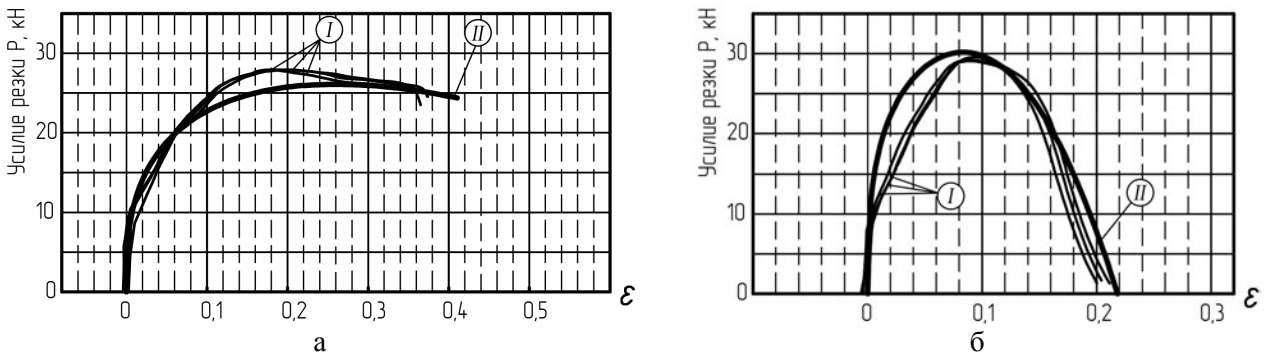


Рис. 1. Осциллограммы I и теоретические зависимости II силы резки параллельными (*а*) и фасонными (*б*) ножами квадратной заготовки сечением 10×10 мм

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

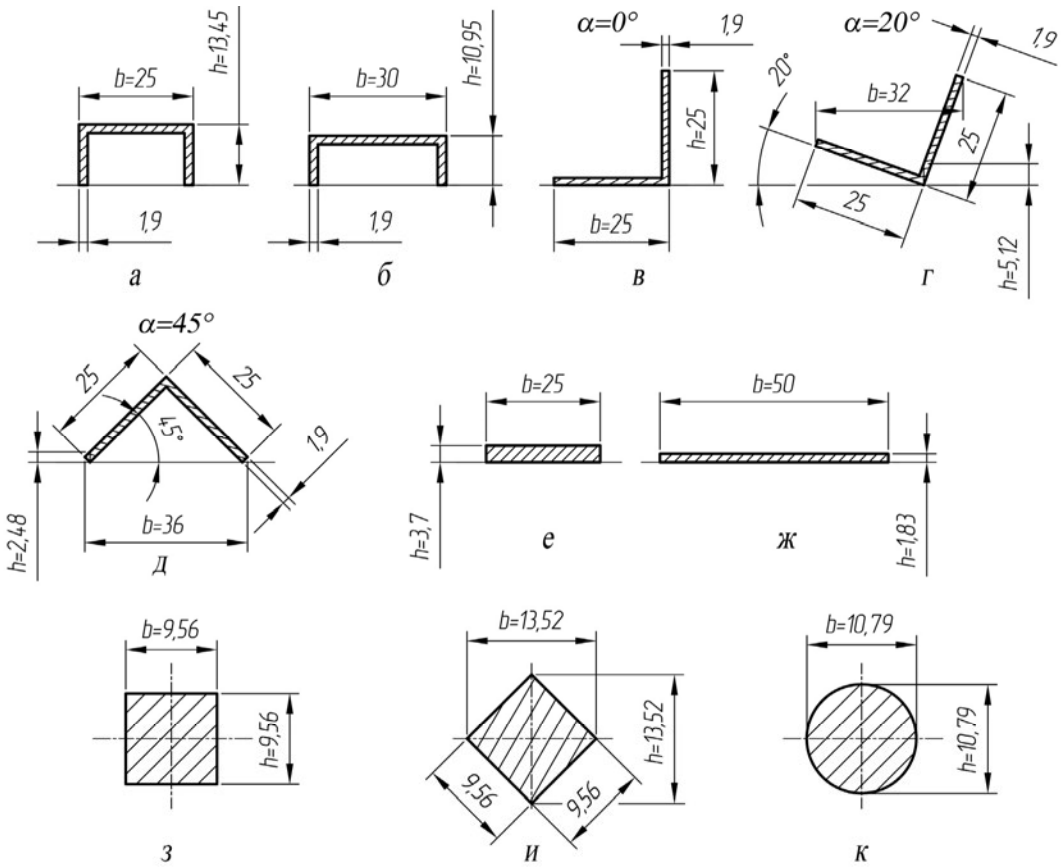


Рис. 2. Типы профилей и их положение при резке в ножевых калибрах:
а, *б* – швеллер; *в*, *г*, *д* – уголок равнобокий, соответственно расположенный относительно горизонтали под углом α=0°, 20°, 45°; *е*, *ж* – полосовой профиль; *з*, *и* – квадрат;
к – круг; геометрические параметры в мм

кинематику движения инструмента, получены уточненные зависимости изменения силы резки от хода ножей, но для комплексной оценки процесса необходим учет расхода энергии.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является установление влияния формы разрезаемого сечения и относительного направления реза на эффективность разделительной операции, определяемой суммарной работой резки при обработке сложнопрофильного металлопроката сортовыми ножницами.

Основной материал исследования

Комплексный подход к решению задач энергоэффективности процесса резки сложнопрофильного металлопроката невозможен без создания математических моделей с последующим обобщением и анализом полученных результатов. Для проверки адекватности разработанной математической модели проведены теоретические и экспериментальные исследования [10] на примере резки квадратных заготовок сечением 10×10 мм из алюминиевого сплава АА6063 [11] в холодном состоянии на ножницах усилием 20 кН с подвижным нижним ножом. В суппортах ножниц располагали пары фасонных (для резки квадрата по диагонали) и параллельных ножей. Для контроля и регистрации основных силовых параметров была собрана измерительная система, включающая тензорезисторный преобразователь, усилитель и компьютер с многоканальным аналого-цифровым преобразователем.

В результате эксперимента получены осциллограммы силы резки P от относительного внедрения ε ножей в металл для параллельных (рис. 1а) и фасонных (рис. 1б) ножей, на которые были наложены теоретические зависимости [10]. Как можно видеть, теоретические и экспериментальные зависимости имеют высокую степень сходимости.

Значения максимальной силы резки необходимы при проектировании нового и модернизации действующего режущего оборудования. Энергоэффективность операции разделения определяет площадь под графиком функции $P(y)$, описывающей изменение силы P от хода ножа y, выражаемая следующей интегральной зависимостью:

$$A = \int P(y)dy . \qquad (1)$$

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

Для моделирования характера влияния формы разрезаемого сечения и его ориентации относительно направления движения инструмента на силу и работу деформации, были выбраны сортовые профили с одинаковой площадью поперечного сечения (S=91,39 мм^2), но разной формы: квадрат, круг, уголок равнобокий, швеллер и полоса (штрипс). Сечения отобранных профилей и их расположение в ножевых калибрах представлены на рис. 2. Следует отметить, что пространственные положения профиля углового равнобокого в ножевых калибрах, представленные на рис. 2в и 2г (угол наклона полок относительно горизонтали α=0° и α=20°) на практике не применяются и приведены в данной работе исключительно в исследовательских целях.

Используя зависимость (1) и результаты работы [10] для отобранных сортовых профилей в положении, представленном на рис. 2, были получены следующие новые результаты. Установлены распределения силы резки, определены их максимальные значения, рассчитаны суммарные работы резки, затрачиваемой на разделение соответствующего профиля (табл. 1). Конечные результаты представлены в виде распределения максимальной силы резки P_{max} от параметра b (ширины горизонтальной проекции сечения) заготовки (рис. 3) и суммарной работы резки A в зависимости от хода ножей h через заготовку (в случае ортогонального расположения заготовки, равного высоте разрезаемого профиля) (рис. 4).

Анализ графических зависимостей позволяет оценить влияние формы и геометрии разрезаемого профиля на распределение силы $P_{\max}$ и суммарную работу A. Для снижения максимальной силы резки ширину, точнее длину горизонтальной проекции разрезаемого профиля на плоскость ножей, следует уменьшать, что согласуется с полученными ранее данными при обработке фланцевых профилей [12]. Однако, при обработке всех 10 вариантов (табл. 1), из которых 5 относятся к фланцевым профилям (швеллер и уголок), предполагать линейную зависимость аппроксимирующей прямой вида $P_{\max}(b)=ab+c$, представленной на рис. 3 будет некорректно, коэффициент корреляции r=0,09 (определялся построением линии тренда и вычислением выборочного линейного парного коэффициента корреляции Пирсона). В свою очередь, построение аппроксимирующей зависимости $P_{\max}(b)$=0,41b+9,65 (на рис. 3 штриховая линия) только для фланцевых профилей дает положительный результат (r=0,93) и может быть использована для анализа процесса.

Работа, затрачиваемая на разделительную операцию, напрямую зависит от высоты разрезаемого профиля [2], но характер распределения (рис. 4) суммарной работы резки $A(h)$ при обработке всего диапазона данных (всех 10-ти вариантов) с достаточной степенью надежности (r=0,95) можно описать следующим выражением:

$$A(h) = 22{,}05h^{0{,}45}.$$

Распределение суммарной работы резки $A(h)$ при анализе результатов только для фланцевых профилей с высокой степенью надежности (r=0,99) может быть представлено линейной зависимостью $A(h)$=2,57h+30 (на рис. 4 штриховая линия) и реализовано в случае необходимости экстраполирования или прогнозирования результатов резки металлопроката.

Выводы

Доказано, что разделение равных по площади, но различных по форме заготовок сопровождается индивидуальными для каждого профиля результатами и дополняет классические представления, учитывающие только площадь разрезаемого сечения.

Табл. 1. Результаты расчетов силы и работы резки

№ п.п.	Профиль	Геометрические параметры		Энергосиловые показатели	
		Высота h, мм	Ширина b, мм	Сила резки $P_{\max}$, кН	Работа резки A, Дж
1	Швеллер 25×13,4×1,9	13,4	25	20,42	67,134
2	Швеллер 30×11×1,9	10,95	30	21,51	55,029
3	Уголок равнобокий 25×25×1,9: – α=0°	25	25	19,25	93,657
4	– α=20°	5,12	32	23,92	47,387
5	– α=45°	2,48	36	23,92	33,373
6	Прямоугольник	3,65	25	24,03	42,88
7	Прямоугольник	1,83	50	24,87	25,927
8	Квадрат	9,56	9,56	23,92	79,377
9	Квадрат на ребро	13,52	13,52	26,97	62,526
10	Круг	10,79	10,79	24,18	72,65

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

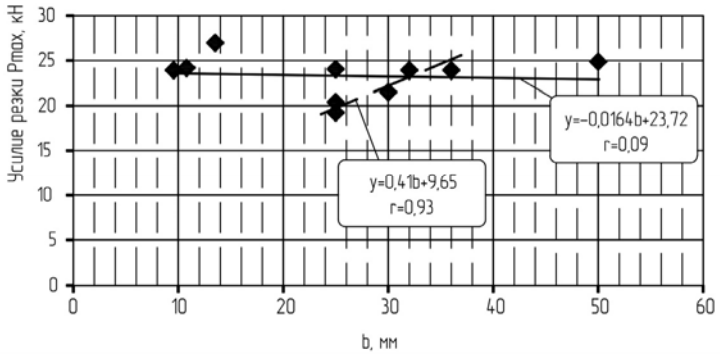


Рис. 3. Распределение максимальной силы резки P_{max} от ширины b при разделении указанных в табл. 1 заготовок (результаты отсортированы по возрастанию относительно b)

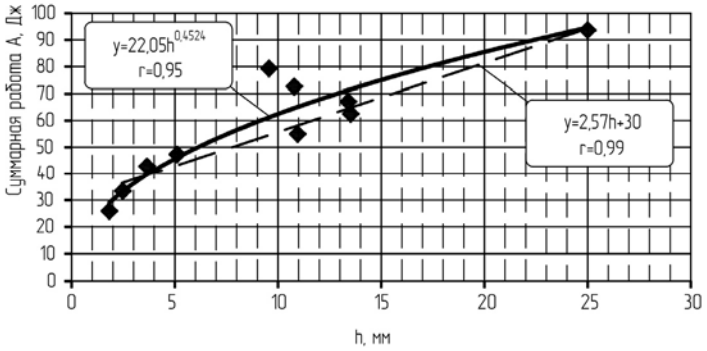


Рис. 4. Распределение суммарной работы резки A от хода ножей h при разделении указанных в табл. 1 заготовок (результаты отсортированы по возрастанию относительно h)

Установлено, что распределение максимальной силы резки при разделении фланцевых заготовок имеет линейный характер, зависящий, в основном, от ширины разрезаемого профиля. Но при обобщении результатов как по фланцевым, так и по простым сортовым профилям, степень влияния параметра b на P_{max} становится более сложной (для аппроксимации требуется полином 5 степени) из-за нелинейного влияния зависимости внедрения инструмента до скола от толщины элементарного объема разрезаемой заготовки.

Работа, затрачиваемая на разделительную операцию, зависит от высоты разрезаемого профиля (хода ножей через заготовку). Характер распределения суммарной работы резки при обработке всего диапазона данных может быть описан указанной выше степенной зависимостью.

Резка квадрата по диагонали, создающая в заготовке только сжимающие напряжения и способствующая меньшему искривлению формы отрезаемого сечения, сопровождается уменьшением расхода энергии на разделительную операцию. Резка квадрата параллельными ножами потребует 79,377 Дж, а фасонными 62,526 Дж, что на 21 % меньше.

Результаты работы могут быть использованы при расчете энергосиловых параметров процесса холодной резки, а также при дальнейших исследованиях разделительных операций сложнопрофильного металлопроката сортовыми ножницами.

Список литературы

1. Трофимчук В.Д. Дефекты прокатной стали и меры борьбы с ними. – М.: Металлургия, 1954. – 632 с.
2. Соловцов С.С. Безотходная разрезка сортового проката в штампах. – М.: Машиностроение, 1985. – 175 с.
3. Ковка и штамповка: справочник. В 4-х т. Т.1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка / Под ред. Е.И. Семенова. – М.: Машиностроение,1985. – 568 с.
4. Трусковский В.И. Развитие теории и практики производства заготовок обработкой давлением на основе совершенствования методов анализа НДС, создания новых способов и устройств: дис. ... док. техн. наук: 05.02.09 / Трусковский Виктор Иванович. – Челябинск, 2014. – 260 с.
5. Карнаух С.Г., Карнаух Д.С., Чоста Н.В. Разработка оборудования для разделения сортового проката (труб) на мерные заготовки с применением нитинола / Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2015. – №2(41). – С. 323-326.
6. Пат. 20130145914 A1 США. МКИ B23D 17/06. Crank scissors having two pairs of blades for cutting rolling strips / G. Heitze, U. Grebe,

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

K. Bäumer; SMS Siemag Aktiengesellschaft, Dusseldorf (DE). – №13/764475; заявл. 11.02.2013; опубл. 13.06.2013.
7. Пат. 3854358 США. МКИ B26D 5/02, B22D 11/126. Profile steel cutter / E. Kruse. – №295121; заявл. 05.10.1972; опубл. 17.12.1974.
8. Целиков А.И., Смирнов В.В. Прокатные станы: учебник для вузов. – М.: Металлургиздат, 1958. – 432 с.
9. Теоретические и экспериментальные исследования процесса горячей поперечной резки непрерывно-литых сортовых заготовок / А.В. Сатонин [и др.] // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: зб. наук. пр. – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2012. – С. 3-10.
10. Боровик П.В., Петров П.А. Теоретическое определение силы резки ножницами фасонных профилей / Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – №5. – С. 41-44.
11. Цвияк А.П. Краткий справочник машиностроителя-международника. – СПб: Питер, 2011. – 384 с.
12. Ульяницкий В.Н., Петров П.А. Влияние формы и расположения профиля на энергосиловые параметры резки фасонного металлопроката сортовыми ножницами / Сб. науч. тр. Донбасского гос. техн. ун-та. – Алчевск: ДонГТУ, 2016. – Вып.3(46). – С. 149-156.

V.N. Ulianitsky /Cand. Sci. (Eng.)/, P.A. Petrov
Donbas State Technical University (Alchevsk)

THE INFLUENCE OF THE CROSS-SECTION SHAPE AND THE LOCATION OF METAL PRODUCTS ON POWER PARAMETERS OF CUTTING WITH SHAPED CUTTERS

Background. *In the practice of metallurgical production, various units are used for the transverse separation of billets. The variety of mechanical cutting schemes complicates the choice of the most rational method of separation and requires additional theoretical and experimental studies. In this regard, the definition of technological opportunities of operated and newly designed equipment for the separation of geometrically-complex rolled metal in the modern section mill is one of the important and urgent tasks.*
Materials and/or methods. *The main indicators of the cutting process which is divided into three stages (cutter indentation in metal, shift, or cut, separation) are the force of cutting, the definition of which is produced by the method of numerical recurrent solutions of finite-difference schemes of the static balance of the allocated elementary volumes. Experimental research methods included: physical modeling of the processes, strain gauge measurement methods and measurement of geometric parameters.*
Results. *Analytical dependencies underlying the mathematical models of cutting process of a variety of profile shapes with cutters correlate well with the experimental data. On the basis of the developed technique, we have performed the simulation of cutting process of geometrically-complex rolled metal of equal cross-section at different process conditions, which allows expanding the understanding of the process and determining the factors influencing the efficiency of the separation process implemented by sectioning scissors.*
Conclusion. *The description of the separation process of the flanges is proposed taking into account, in contrast to the classical view, not only the influence of the cross-sectional area of the billet on the value of the maximum force and the total performance of cutting, but also the shape (location) of the profile relative to the movement of the cutters. The obtained values of the maximum force and cutting performance at various schemes of implementation of the separation of shaped sections by the varietal scissors clarify and extend the classical representation of the process in the locus of cutting. This allows setting adequate initial parameters in the design of new mechanical equipment and modernization of existing processing units.*

Keywords: *shaped metal products, profile cutters, cutting force, cutting performance, angle, channel bar, strip.*

Статья поступила 07.09.2016 г.
© В.Н. Ульяницкий, П.А. Петров, 2016
Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронько

УДК 620.1.08

В.Е. Махов /д.т.н./, С.Е. Шалдаев /д.т.н./
Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского (Санкт-Петербург)

ВЫСОКОТОЧНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ФОРМЫ ИЗДЕЛИЙ И ИНСТРУМЕНТА

Проведены исследования системы определения функции контрастной границы, в изображении контролируемого изделия методом его преобразования в изображение кривой. Исследованы факторы, влияющие на погрешность определения функции границ при использовании различных алгоритмов, в т.ч. алгоритма определения координат максимумов коэффициентов непрерывного вейвлет-преобразования (НВП). Показано, что при использовании метода коэффициентов НВП погрешность измерений функции координат границ в два раза ниже, чем при анализе распределения освещенности. Доказана возможность определения координаты резкого скачка и излома в границе изображения с точностью 0,1 пикс.

Ключевые слова: *система технического зрения, непрерывное вейвлет-преобразование (НВП), фильтрация изображения, граница теневого изображения.*

Постановка проблемы

Системы технического зрения находят широкое применение в автоматизированных системах контроля линейных размеров формы готовых изделий или технологического инструмента. На практике возникают задачи контроля геометрических параметров изделий в условиях воздействия мешающих факторов, например, в условиях механической нестабильности объекта контроля.

В ряде случаев, с целью получения измерительной информации используют специальные методы обработки получаемых изображений. При этом удается достичь высокой чувствительности к измеряемому параметру, однако возникают трудности в определении степени влияния мешающих факторов. Вследствие этого, трудно гарантировать метрологическую точность измерений. В настоящее время следует различать методы измерений для идеальных контрастных изображений и для изображений, с размытой информационной структурой. Часто трудно заранее классифицировать качество получаемых изображений, или в процессе применения измерительного средства параметры изображения могут в той или иной степени меняться. В этих случаях снижается точность измерения классическими методами, не в полной мере реализуются возможности для выделения информационной составляющей специальными методами информационной обработки изображения.

Актуальной задачей совершенствования измерительных систем технического зрения промышленного применения является разработка единой методики их применения в широком диапазоне изменения внешних условий, влияющих на характер изображения. Решение этой задачи позволит повысить точность измерения измеряемых параметров объекта контроля, снизить требования к измерительной системе при воздействии на нее внешних факторов.

Анализ последних исследований и публикаций

Широко известны специализированные промышленные оптические измерительные системы контроля геометрических параметров формы изделий и инструмента [1]. Однако, такие системы аппаратно детерминированы и не позволяют производить методических усовершенствований измерений. В то же время компьютерные технологии дают возможность проводить разработку сложных измерительных систем для широкого круга лабораторных и промышленных систем контроля [2], предоставляя широкие возможности использовать математические методы обработки сигналов.

Применения методы интегральных преобразований сигналов [3] максимально используется исходная информация, в т.ч. за определенный промежуток времени, что способствует эффективному выделению доминантной информационной составляющей сигнала на фоне различных мешающих факторов. В результате повышается точность измерения интересуемых параметров сигнала. Например, использование метода непрерывного вейвлет-преобразования (НВП) распределения освещенности изображения [4] повышает точность измерения линейных размеров теневого изображения, в т.ч. полученного с разфокусировкой оптической системы [5], в условиях механической нестабильности объекта кон-

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

троля [6] и структурированного шума [7].

Вейвлет-преобразование локально определяет первую и вторую производную сигнала [5] в дискретной выборке. Это дает возможность определять параметры контура теневого изображения [8]. Однако в виду протяженности анализируемого фрагмента не обеспечивается точность измерения его формы. Аналогично вейвлет-анализ позволяет повысить точность измерений формы изделий на основе метода определения координат световых меток [9]. Измерительные алгоритмы НВП определения границы контраста теневого изображения и координат световых меток имеют общую природу.

Определение линейных размеров теневого изображения методом НВП содержит систематическую погрешность, вызванную особенностями градиента перепада освещенности в области границ, для компенсации которой нужна вторая граница изображения с обратным градиентом. Вдоль границы одного изображения функция градиента может меняться, что вызвано свойствами оптической системы, так и степенью контраста изображения. Для локализованных световых меток характер градиента границ во всех направлениях мало зависит от свойств оптической системы. Следует предположить, что для повышения точности измерения формы границы изображения, целесообразно преобразовать границу теневого изображения в графическую структуру (кривую линию) проходящую через границу изображения, обеспечив симметричный градиент освещенности границ кривой.

Приведенный анализ говорят о том, что необходимы модельные исследования процесса определения координат кривой с одной стороны, с другой – поиск алгоритмов, работающий в условиях структурно преобразованных изображений, не чувствительных к распределенным факторам шума и обеспечивающих локальную информативность.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является исследование точности различных измерительных алгоритмов для геометрических размеров формы изделий в их оптическом изображении при использовании метода формирования изображения кривых границ его контраста.

Основной материал исследования

Для преобразования границ изображения в кривую линию контраста можно использовать различные методы и алгоритмы. Можно использовать разницу двух масштабно преобразованных изображений $Im_2=\beta_1\{Im_0\}-\beta_2\{Im_0\}(\beta_1>\beta_2)$, или использовать функции фильтрации $F\{Im_0\}$. В первом случае кривая границы в меньшей степени содержит систематическую погрешность преобразования изображения в изображение контура границ контраста. Однако такое преобразование, дает ошибку масштабирования и перепикселизацию границ изображения (псевдо случайная погрешность). Масштабные преобразования реализуются путем изменения разрешения изображения алгоритмом интерполяции. Для выделения линий контуров контраста изображения можно использовать функции фильтрации [10]: Лапласа (Laplacian), Diff., Превитта (Prewitt), Собеля (Sobel), Робертса (Roberts), Кэнни (Canny). Эти алгоритмы позволяют выделить локализованную структурную кривую контраста определенной ширины и контрастом, которая соответствует функции градиента контраста в изображении.

Для исследования точности определения функции кривой границы в изображении $y(x)$ были разработаны тестовые теневые изображения максимального контраста, функция границы которого была заранее задана кусочно-непрерывными аналитическими функциями. По реперным точкам формировался пограничный контур теневого изображения. На рис. 1а представлено тестовое изображение (размер $n_x \times n_y = 1280 \times 720$ пикс.), состоящий из последовательности протяженных фрагментов (100 пикс.) с границами различного наклона и скачками функции границ между фрагментами:

$$y^{model}(x)=\sum[f_i(x)]_{\Omega i}, \qquad (1)$$

где $f_i(x)=k_i x+a_i$, $x\epsilon\Omega_i$, наклон границы изображения $k_i=\mathrm{tg}(\alpha_i)=(dy/dx)_i$.

Для построения функции указанных кривых границы изображения и проведения измерения ее координат различными алгоритмами был разработан исследовательский виртуальный прибор (ВП) в среде разработки приложений NI LabVIEW с модулем технического зрения NI IMAQ Vision [3], блок-схема которого представлен на рис. 1б.

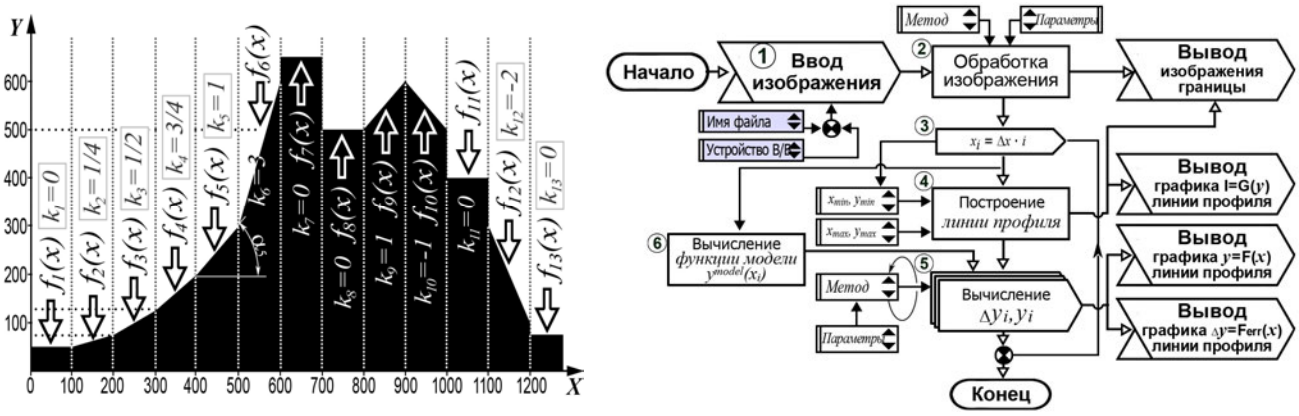
Набор функций 1 модуля NI IMAQ Vision [2] реализует получение изображения из файла или с цифровой камеры. Функции 2 формирует и отображает изображения кривой границы изображения $y_i=f(x_i)$ заданным методом. Цикл 3, реализованный циклической структурой (While Loop) и структурой объектно-ориентированного программирования (Event Structure), обеспечивает последовательность всех вычислений функции границы для координат x_i. Функция 4 выделяет распределение освещенности вдоль заданной прямой линии профиля изображения. Модуль 5 обеспечивает вычисление координаты y_i

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

различными методами и их погрешностей Δy_i по отношению к заданной функции (1).

Лицевая панель ВП реализована в виде нескольких закладок, на которых сгруппированы элементы управления, позволяющие задать параметры функций обработки исходного изображения. Графические индикаторы отображают построенную кривую границы изображения, вычисленные графики функции границы и ошибок, полученные различными методами. На первой закладке ВП (рис. 2) на графическом индикаторе 1 отображается изображение выделенной границы теневого изображения, установки координат линии профиля изображения 2, графический индикатор распределение освещенностей в выбранной линии профиля $I(y)$ 3.

Текущая линия профиля изображения $L_i(x_i)$ задается начальными $P_1(X_1,Y_1)$ и конечными $P_2(X_2,Y_2)$ координатами прямой линии (для вертикально линии профиля координаты: $X_1=X_2$, $Y_1=0$, $Y_2=Y_{Im}$). Линия профиля $L_j(P_1P_2)$ может иметь произвольную ориентацию, например, перпендикулярно касательной контуру изображения в точке с координатой x_j. В этом случае координаты y_i определяются через вспомогательную систему координат $X'0Y'$ в наклонной линии профиля $y'=y_j$. Для вычисленной координаты y_i определяем координаты наклонной линии профиля $P_1^{\beta}(x_{1i},y_{1i})$-$P_2^{\beta}(x_{2i},y_{2i})$. Для простоты принимаем $y_{1i}=0$:



а б

Рис. 1. Модельные исследования измерений: *а* – тестовое изображение; *б* – блок схема ВП

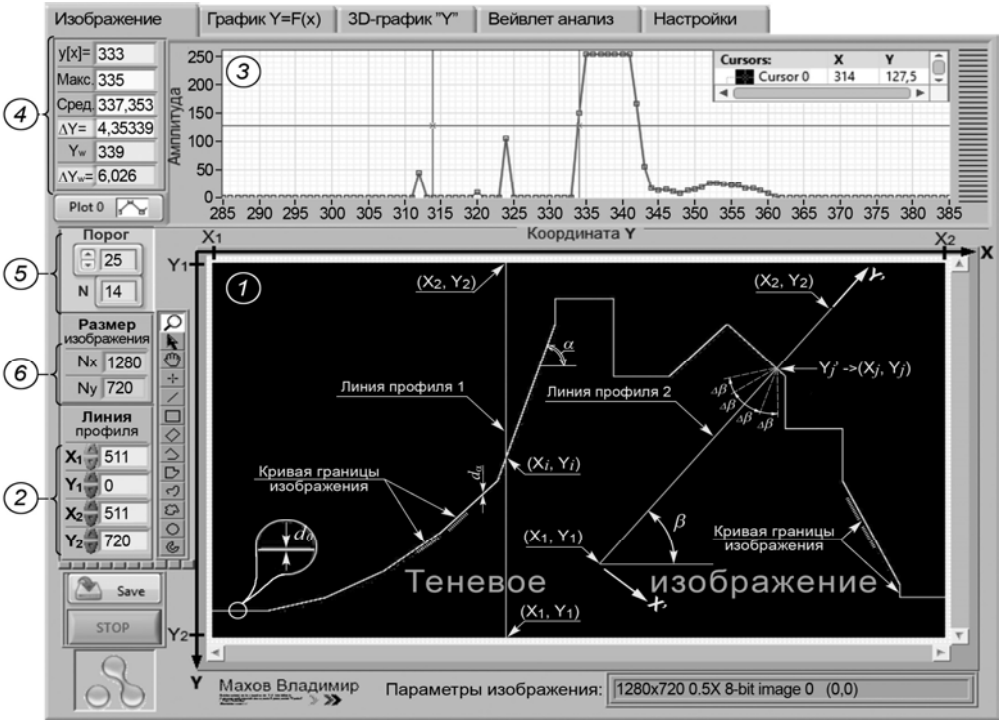


Рис. 2. Первая закладка лицевой панели ВП:
1 – индикатор границы теневого изображения; *2* – установка координат линии профиля; *3* – индикатор распределения освещенности в линии профиля; *4* – индикаторы вычисленных значений; *5* – установка порога; *6* – индикаторы размера исходного изображения

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

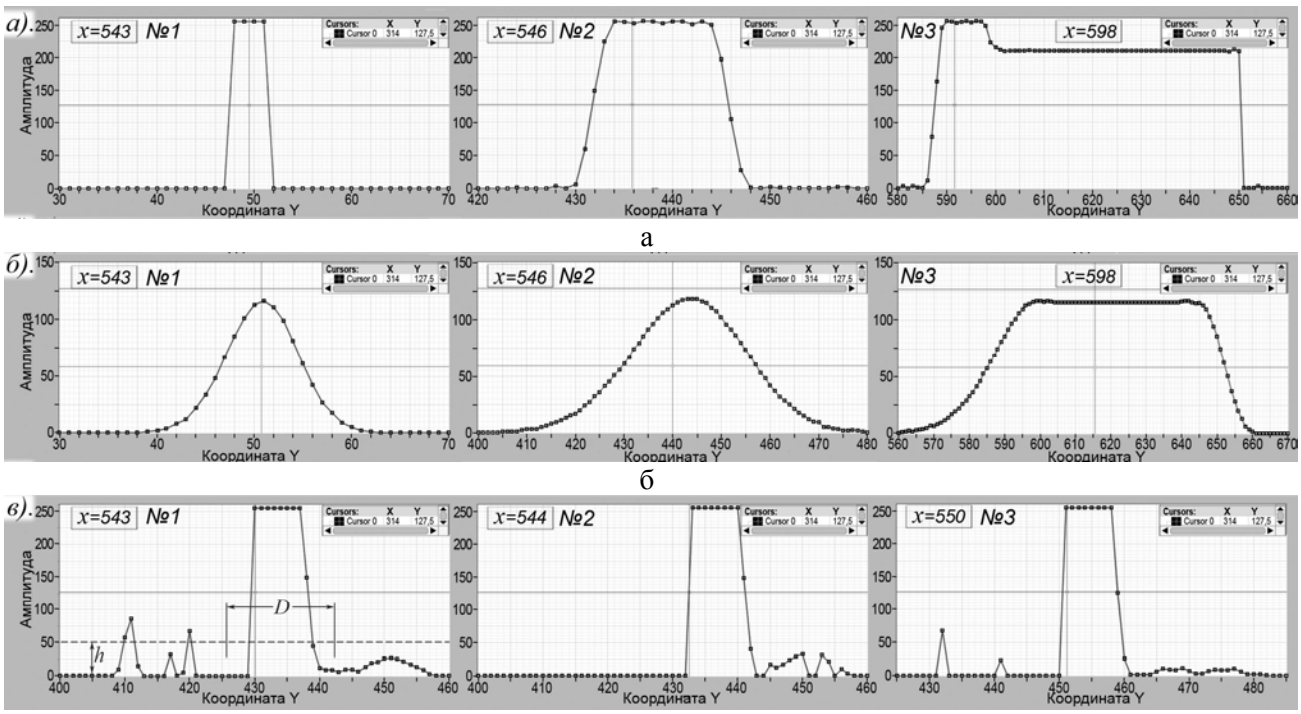


Рис. 3. Распределения интенсивностей вдоль линии профиля изображения по координате *Y*:
а – для резкого контура кривой разницы масштабных изображений;
б – для изображения контура кривой разницы масштабных размытых изображений (*R*=4);
в – для контура кривой фильтрации изображения

$$x_{1i}=x_i+y_i/\mathrm{tg}\beta_i,\ \ x_{2i}=x_i+q_i,\ \ y_{2i}=(x_{2i}-x_{1i})\mathrm{tg}\beta_i, \qquad (2)$$

где $q_i<n_y$ – заданное смещение конечной точки.

Отсюда видно, что неопределенность определение координата x_i:

$$x_i=x_{1i}(\beta_i)+y_i/\mathrm{tg}\beta_i,\ \ \delta x_i=\delta y_i/\mathrm{tg}\beta_i.$$

Для вертикальной линии сканирования (90°) координата $x_i=x_{1i}(90^o)$, для горизонтальной линии сканирования (0°) координата x_i не определена. С учетом разворота системы координат $X'0Y'$, определение координаты y_i соответствует определению координаты x_i. Сканирование произвольно заданной линии профиля в заданной точке x_j изображения по углу ее наклона позволяет получить набор координат $\{y_k\}$ для нахождения усредненного значения $<y_i>$ в заданной точке, которое устраняет влияние факторов шума и пикселизации в окрестности кривой границы изображения x_i.

При различном наклоне границы изображения (α_i) в зависимости от положения линии профиля меняется характер функции распределения интенсивностей $I(y)$ (рис. 3). Характер распределение $I(y)$ в различных линиях профиля изображения имеют особенности, которые влияют на результаты вычисления координаты $y(x_i)$, например, методом средневзвешенного значения. Число не нулевых элементов распределения $I(y)$, или число элементов (выше установленного порога), характеризует исходную информационно-измерительную емкость системы, что в свою очередь определяет потенциальные возможности вычисления координат, с точностью превышающей 1 пикс. изображения.

Ширина контура распределения освещенности $I(y)=g(y_i)$ определяется шириной выделенной линии границы изображения (d_0). С увеличением наклона кривой контура границы, ширина контура $I(y)$ вдоль линии выделения уширяется (рис. 3а). Наиболее неблагоприятный случай возникает в месте скачков функции в области разрыва функции границы $f(x_i)$, ширина контура $I(y)$ для координат находящихся в зоне разрыва ($x_c+d_0/2<x_i<x_c-d_0/2$) будет соответствовать разрыву функции в точке x_c: $f(x_c+0)-f(x_c-0)$. При размытии границы изображения кривой, функции распределения интенсивностей $I(y)$ в линиях профиля приобретают плавный характер (рис. 3б). В случае применения для выделения кривой границы контраста алгоритмов фильтрации в большей степени имеют место возникновение боковых артефактов в распределении освещенности $I(y)$ (рис. 3в), что связано с топологией используемого фильтра. Для повышения точности вычисления координаты y_i по средневзвешенному значению $I(y)$, в алгоритме предусмотрено установка порога (h) 5 (рис. 1б), и диапазона области локализации распределения $I(y)$-(D), вне которых

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

значения выборки распределения $I(y)$ обнуляются.

Для каждого контраста и наклона границы изображения (полученных методом фильтрации) наблюдается периодическая повторяемость характерных особенностей формы кривых распределения интенсивности $I(y)$ для координат идеального изображения равного наклона границ, которая определяется совокупным влиянием топологии фильтра. Для изображений, полученных с сенсора изображения, форма кривых будет также зависеть от топологии матричного приемника, внутри процессорной обработки цифрового устройства, локальных дефектов изображения формируемого оптической системой. Для размытых границ изображения – геометрическими и физическими свойствами оптической системы, степенью размытия [11].

Погрешность определения координаты границы $y(x)$ для модельных изображений вычислительных экспериментов определяется разницей координаты полученной вычислением координаты и заданной аналитической зависимости модельной границы (1) $y^{model}(x)$:

$$\delta y_i(x_i)=\langle g(x_i)\rangle^{method}-y_i^{model}(x_i).$$

Для определения координаты границы y_i можно использовать различные алгоритмы, учитывающие особенности распределение $I(y_i)$. Наиболее простой метод определения является вычисление средневзвешенного значения выборки:

$$y_i^{av}=\sum i\cdot y_i^h/\sum y_i^h,$$

где $y_i^h=\{y_i, y_i>h\}$ и $\{0, y_i<h\}$.

Другим методом определение координаты y_i является нахождения координат максимумов коэффициентов НВП [4-6]. Вейвлет представление сигналов обладает локальностью и малой потерей информационной составляющей. Спектральные образы вейвлетов согласуется с природой фильтрации и реструктуризацией изображения, что обеспечивает устойчивость результатов к воздействующим факторам, обеспечивая стабильность измерительных результатов в широком диапазоне параметров обработки изображения. Детектирование локализованных кривых границы в большей степени уменьшает влияние информационных составляющих удаленных фрагментов изображения. Можно полагать, что использование вейвлет-анализа применительно к выделенным границам изображения повышает точность измерения профиля теневого изображения. Функции вейвлет-анализа сигналов реализованы в NI LabVIEW дополнительного пакета NI «Advanced Signal Processing Toolkit» [12]. В методе НВП выбирают тип вейвлета, метод определения координат максимумов коэффициентов НВП, параметры дополнительной фильтрации сигналов.

На этапе вейвлет-анализа стоит вопрос точного определения координат y_i по максимумам кривых коэффициентов НВП. В зависимости от типа вейвлета кривые коэффициентов НВП имеют различную форму с разным числом и взаимным расположением максимумов и минимумов [4]. Можно отметить, что координаты некоторых максимумов для ряда вейвлетов практически совпадают с детектируемой координатой, другие имеют смещение (рис. 4). Характерно, что сама шкалограмма (рис. 5б) имеет периодическую структуру по оси «Шкала». Методика определения относительных координат локализованных сигналов описана в работах [4,9].

Вычислительные эксперименты показали, что достаточную точность определения абсо-

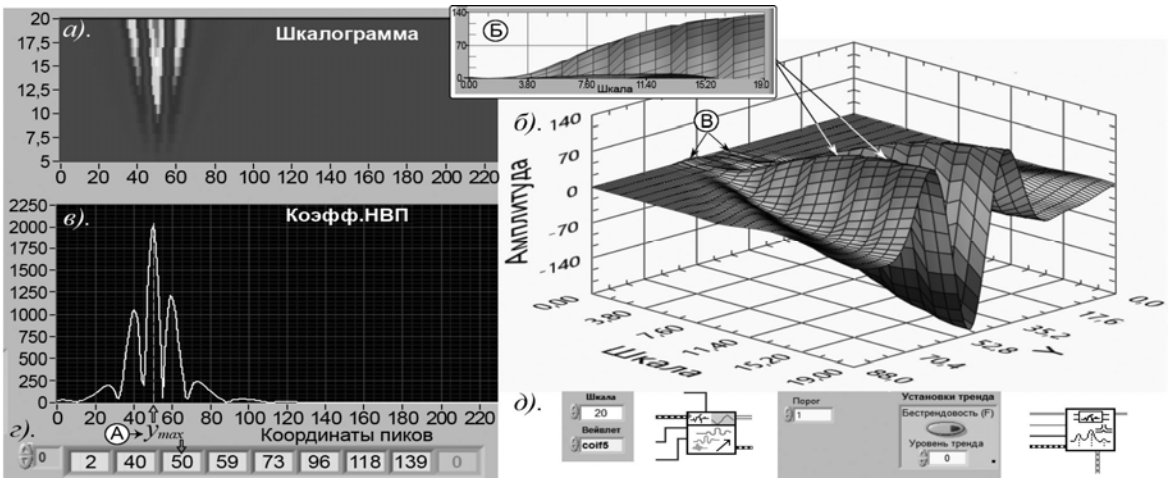


Рис. 4. НВП (coif5):
а и *б* – шкалограмма НВП – график интенсивностей и 3D-график; *в* – кривые коэффициентов НВП; *г* – массив координат пиков; *д* – установки параметров функций обработки

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

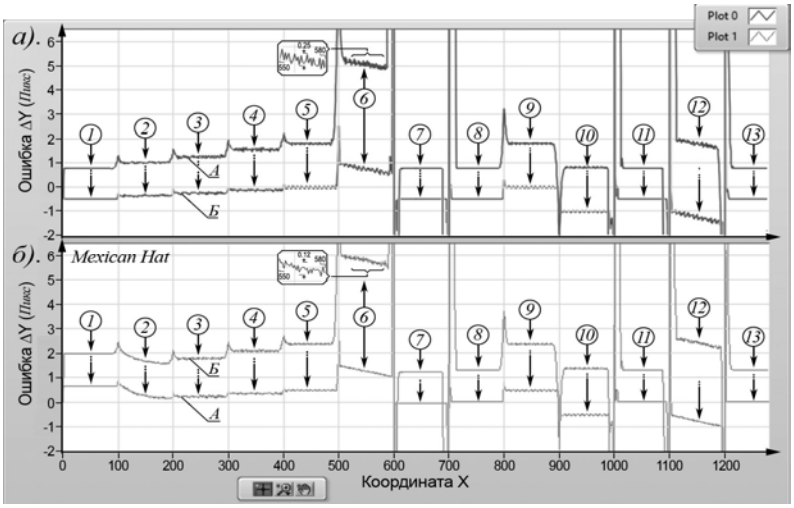


Рис. 5. Распределение погрешностей для фрагментов резкого (А) и размытого (Б) изображения: *а* и *б* – метод анализа распределения освещенностей и максимумов кривых коэффициентов НВП

лютных координат в широком диапазоне варьируемых параметров обеспечивает простейший способ вычисление средневзвешенного значения всей выборки кривых коэффициентов НВП. Однако для каждого типа сигнала и выбранного вейвлета можно использовать методику анализа совокупности взаимного положения максимумов, что эквивалентно фильтрации особенностей сигнала [4].

На рис. 5 представлены графики вычисленной погрешностей для тестового изображения резкого (А) и размытого (Б) изображения методом среднеквадратичной погрешности (рис. 5а) и методом нахождения максимумов кривых НВП для вейвлета «Mexican Hat». Характерной особенностью вейвлета «Mexican Hat» является то, что он симметричный, не имеющий компактного носителя.

Графики погрешностей во всех фрагментах изображений показывают наличие систематической погрешности (в зависимости от угла наклона границы) и «случайной» (осциллирующей). Характер поведения кривых погрешностей сохраняется для всех фрагментов изображения при любых методах информационного анализа координаты. В области границ фрагментов (i, i+1), где происходит резкое изменение угла наклона границ, наблюдается всплеск погрешности, которая зависит от изменения угла наклона границ, область всплеска определяется шириной и наклоном кривой. Всплески погрешностей имеют максимальные значения в местах разрыва функции границ. Направление всплеска погрешностей совпадает с направлением изменения угла наклона границ. Характер поведения погрешностей объясняется процессом перепикселизации структуры наклонной границы изображения.

Совпадение особенностей осцилляции случайных погрешностей, в областях границ изображения сравниваемых методов указывает на то, что она вызвана исключительно дискретным характером структуры изображения. Погрешность метода кривых НВП более чем в два раза меньше метода прямого анализа распределения освещенностей. Интересно отметить, что для фрагмента изображения (2), имеющего постоянный небольшой наклон, метод НВП дает ниспадающую зависимость систематической погрешности, что определяется близостью границы к краю изображения и отсутствия компактного носителя для выбранного типа вейвлета. В то же время для других типов вейвлетов (имеющих компактный носитель) данный эффект отсутствует. Для классического вейвлета «Haar» систематическая погрешность для размытого изображения в некоторых фрагментах выше, а случайная – меньше, что связано с тем, что выборка не нулевого распределения освещенности размытого изображения больше.

Для вычисления координаты возможно использование других типов известных вейвлетов, применение которых имеют свои особенности, такие как увеличение или уменьшение систематической и случайной погрешностей во фрагментах изображения. Например, для серии вейвлетов Добеши («db 02»-«db 14») систематическая и случайная погрешность выше, и, как правило, имеют тенденцию к возрастанию с увеличением порядка данного типа вейвлета, при этом сильно зависит от угла наклона кривой. Применение вейвлета типа «coif1» имеет такую же систематическую и даже более низкую случайную погрешность для широкого диапазона наклона кривой профиля изображения, однако, при больших наклонах возникает сильно осциллирующая случайная погрешность. Систематическая и случайная погрешность в группе вейвлета типа «coif1»-«coif5» имеют так же тенденцию

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

возрастать.

Существует два подхода к повышению точности определения координаты y_i: непосредственный учет систематической погрешности для вычисленного наклона кривой изображения; построение линии профиля изображения, перпендикулярной касательной кривой профиля пересекающей ее в точке x_i. Второй подход в ряде случаев является более предпочтительным, т.к. в процессе сканирования линии профиля ширина сечения линии распределения освещенности кривой границы остается практически одинаковой, что снижает систематическую погрешность. Однако, при этом постоянно меняется пиксельная структура сечения изображения, кроме того координаты x_i определяются интерполяционным вычислением. В этом случае погрешность определения координат y_i достигает 0,1 пикс.

В обоих случаях встает вопрос повышения точности определения максимумов кривых НВП. В ряде случаев эффективным являются методы регрессионного анализа, аппроксимация кривой коэффициентов гауссианом. Более полный учет особенностей пиксельной структуры изображения можно произвести путем усреднения измерений по набору линий профиля с различными углами наклона.

Наиболее неблагоприятный случай является скачок измеряемой координаты $y(x_f)$. При увеличении ширины кривой границы изображении функция скачка распределяется на проекционную область ширины кривой вдоль координаты $0X$, примерно соответствующую ширине формируемой кривой границы изображения, при этом погрешность в этой области резко возрастает. Для повышения точности определения координаты скачка x_f эффективно использовать сканирование горизонтальной линии профиля. В этом случае координату скачка функции можно определить с точностью долей пикселей. Однако этот способ трудно автоматизировать программно. Другим случаем, как уже говорилось, являются случаи резкого изменения функции (изломов), когда максимума или минимума производной ее не существует. Используя описанный выше исследовательский ВП нетрудно показать, что анализ распределения освещенности в линии профиля изображения дает возможность определить параметры такой функции с более высокой точностью, чем прямой анализ выборки.

Выводы

1. Использование методов построение изображения кривых границ теневого изображения реализует высокоточные методы вычисление функции профиля контрастной границы фрагментов изображения, имеющих различные углы наклона, включая вертикальные скачки границы.

2. Применение методов анализа кривых коэффициентов НВП функции распределения освещенности профиля с различными типами вейвлетов более чем в 2 раза повышает точность определения координат профиля изображения при вертикальном сканировании линии профиля, при наклонном сканировании – в 5-10 раз.

3. Метод анализа кривых коэффициентов НВП распределения освещенности в вертикальной линии профиля детектирует скачки профиля поверхности (разрыв функций) и определять координату скачка с точностью 1 пикс.

4. Использование метода построения кривых границ контраста в изображении расширяет область применения систем технического зрения в измерительных задачах, т.к. появляется возможность проводить контроль геометрии изделий имеющих ступенчатый профиль или изломы профиля.

Список литературы

1. Мировой лидер высокоточных измерений. Оптические системы. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://mitutoyo.ru/ru_ru/products/optical-measuring/
2. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision / Ю.В. Визильтер [и др.]. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 464 с.
3. Makhov V.E., Potapov A.I. Heterodyne-screen method of inspection of part quality (a review) / Russian Journal of Nondestructive Testing. – 1990. – Vol.25, Issue 10. – P. 756-770.
4. Махов В.Е., Потапов А.И. Использование алгоритмов вейвлет анализа для построения оптических измерительных систем / Контроль. Диагностика. – 2013. – №1. – С. 12-21.
5. Махов В.Е., Потапов А.И. Использование вейвлет-анализа для диагностики системы технического зрения / Контроль. Диагностика. – 2011. – №9. – С. 11-18.
6. Махов В.Е., Потапов А.И. Исследование измерительной оптической системы в условиях механической нестабильности объекта контроля / Контроль. Диагностика. – 2013. – №2. – С. 12-23.
7. Махов В.Е., Репин О.С., Потапов А.И. Измерение линейных размеров системами технического зрения в когерентном свете / Контроль. Диагностика. – 2014. – №4. – С. 12-19.
8. Махов В.Е. Использование алгоритмов вейвлет-анализа в исследовании кинетики формирования порошково-обжиговых покрытий / Конструкции из композиционных материалов. – 2010. – №3.– С. 28-36.
9. Махов В.Е. Исследование алгоритмов вейв-

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

лет-преобразования для определения координат световых меток / Вопросы радиоэлектроники. Сер. «Техника телевидения», Вып.2. – СПб: ФГУП НИИТ, 2012. – С. 78-89.
10. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М: Техносфера, 2005. – 1007 с.
11. Махов Е.М., Потапов А.И., Махов В.Е. Прикладная оптика: учеб. пос. – СПб: СЗТУ, 2004. – 348 с.
12. Лиференко В., Закутаев А., Махов В. Компьютерная реализация методов вейвлет-анализа в среде разработки виртуальных приборов NI LabVIEW / Компоненты и технологии. – 2015. – Т.9, №170. – С. 132-139.

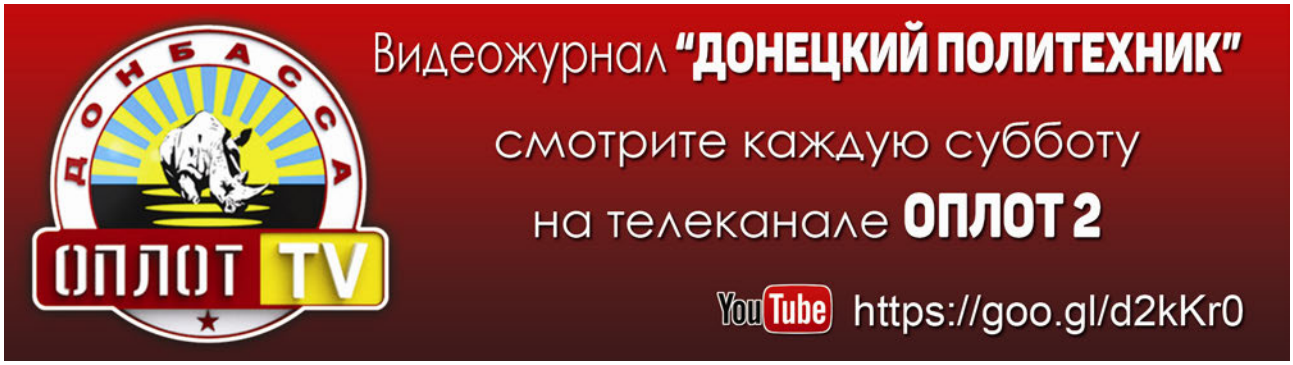
V.E. Makhov /Dr. Sci. (Eng.)/, S.E. Shaldaev /Dr. Sci. (Eng.)/
Mozhaisky Military Space Academy (St. Petersburg)

HIGH-PRECISION OPTICAL SYSTEMS FOR MEASURING FORMS OF PRODUCTS AND TOOLS

Background. *Vision systems are widely applied in automated systems for industrial control of shape and linear dimensions of products and production equipment. It is not always possible to provide conditions for carrying out high-precision measurements, which reduces the performance of primary equipment. Therefore, the urgent task is to develop methods of application of measurement algorithms in a wide range of changes in external conditions affecting the nature of the image.*
Materials and/or methods. *To obtain an independent measurement of the product's fragments the method of the image of curved borders of its contrast is used. To build the surface shape of products the method of scanning the profile line of the optical image is used. When calculating the coordinates of borders functions the method of analysis of the maxima of the curves of ratios of continuous wavelet transform (CWT) is used. For model studies, the virtual appliance and the technology of the National Instruments Company are developed and used.*
Results. *The application of the method of analysis of the maxima of the curves of ratios of CWT allows more than two times increasing the accuracy of determining the coordinates of the image profile in the vertical scanning of the image profile line. At oblique scanning of the profile line, including scanning perpendicular to a tangent to the surface shape, the measurement accuracy increases by 5-10 times. Horizontal scans with an accuracy of 0.1 pixels allow determining a coordinate of the profile leap. When scanning the inclination angle of a profile line at each measurement point there is the elimination of the pixelization effect and the image defects.*
Conclusion. *Model experiments showed the possibility to reach the 0.1-pixel accuracy of measurements of images profile. The possibility of determining the coordinates of the leap and the kink within the boundary of the image with an accuracy of 0.1 pixels is proved. The main applications of high-precision measurement of geometric shapes of shadow images with one-sided or partial access to the measured object determined.*

Keywords: *vision system, continuous wavelet transform (CWT), image filtering, the border of the shadow image.*

Статья поступила 23.09.2016 г.
© В.Е. Махов, С.Е. Шалдаев, 2016
Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронько



Expo Coating MOSCOW

25–27 октября 2016

Москва
Крокус Экспо

14-я Международная выставка технологий, оборудования и материалов для обработки поверхности и нанесения покрытий
на металлы • сплавы • пластические массы • дерево • керамические материалы • бетон



Организаторы:
primexpo ITE
+7 (812) 380 6002/00
coating@primexpo.ru

При участии:
РХТУ им. Д. И. Менделеева
Российское химическое общество им. Д. И. Менделеева
Московское химическое общество им. Д. И. Менделеева
Российское общество гальванотехников

Забронируйте стенд:
expocoating-moscow.ru

0+

NDT RUSSIA

ufi Approved Event

25–27 октября 2016

Москва
Крокус Экспо

16-я Международная выставка оборудования для неразрушающего контроля и технической диагностики



Организаторы:
primexpo ITE
+7 (812) 380 6002/00
ndt@primexpo.ru

Забронируйте стенд:
ndt-russia.ru

0+

К 115 ГОДОВЩИНЕ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ПРОФЕССОРА ВАСИЛИЯ АЛЕКСАНДРОВИЧА СОРОКИНА



Сорокин Василий Александрович (1901-1977 г.г.) родился 5 февраля 1901 г. в деревне Кожаево Никольского района (уезда) Вологодской области. После окончания в 1919 г. Никольской советской школы II ступени поступил в Московскую горную академию, но из-за тяжелых материальных условий того времени прекратил учебу и работал учителем в Кожаевской сельской школе I ступени, откуда был призван в Красную армию. В марте 1920 г. был направлен для обучения в Уральский горный институт, который закончил в 1927 г. Во время учебы временно работал инструктором-статистом Уралзолота (1920 г.), преподавателем пехотных курсов (1921-1922 г.г.) и бухгалтером (1923 г.). С 1923 по 1929 г. работал в Уралгипромезе, где им разрабатывались проекты цехов Магнитогорского металлургического завода и проект реконструкции доменных цехов шести уральских заводов. С марта 1929 г. он переведен в Управление Магнитостроя, откуда был на полтора года (1930-1931 г.г.) командирован в США и Германию. В фирме МакКи (Кливленд, США) руководит проектированием доменного цеха Магнитогорского металлургического комбината и заказом импортного оборудования в Германии. На строительстве и эксплуатации первых четырех доменных печей (по 1935 г.) работал на руководящих должностях старшего инженера, начальника технико-производственного отдела, заместителем начальника доменного цеха, руководителем доменной группы проектного управления.

С 1935 по 1947 г. работал в Уральском индустриальном институте (Свердловск) на научно-педагогической работе. В 1938 г. утвержден в ученом звании профессора кафедры «Металлургия чугуна» и назначен заместителем директора по учебной и научной работе. Одновременно по совместительству работает консультантом по проектированию Уральского машиностроительного завода и Всероссийского научно-исследовательского института охраны труда и техники безопасности, а также техническим руководителем опытной станции углежжения Главлесчермета.

В 1947 г. В.А. Сорокин избран заведующим кафедрой «Металлургия чугуна» Донецкого индустриального института (ныне ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»), где проработал до 1977 г. Одновременно (1949-1956 г.г.) был заместителем директора по научной работе.

В 1931-1947 г.г. основными направлениями научной деятельности профессора В.А. Сорокина были: освоение технологии мощных домен-



С аспирантами А.И. Ивановым и С.Т. Плисковским

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org



С выпускниками кафедры «Металлургия чугуна» Донецкого индустриального института

ных печей, перспективы развития доменной техники и оборудования; теория доменного процесса; снижение расхода горючего; повышение интенсивности доменного процесса и улучшения качества чугуна применительно к металлургической промышленности восточной части СССР; тепловое регулирование доменного процесса и создание автоматических приборов для этой цели, а также активация и повышение качества агломерата и интенсификация агломерационного процесса. С 1948 г. активно занимается вопросами развития металлургической отрасли Украины. Ведет работу по использованию криворожских кварцитов, по получению и испытанию активированных и офлюсованных агломератов.

В 1953 г. В.А. Сорокин защищает в Московском институте стали и сплавов диссертацию на тему «Тепловое регулирование доменного процесса» и ему присваивают учёную степень доктора технических наук.

Дальнейшими особо весомыми научными направлениями были: высокий до 1000-1500 °С нагрев дутья и максимальное удаление из доменных печей балласта в виде азота и паров воды; создание новой теории математического описания доменного процесса и стабилизации процесса с помощью электронных вычислительных устройств; развитие учения о рециркуляционной доменной плавке с максимальной заменой кокса менее дефицитными видами топлива; технология бескоксовой доменной плавки с вдуванием горячих восстановительных газов, угольного топлива и технического кислорода.

За 50 лет инженерной и научно-педагогической деятельности профессор В.А. Сорокин подготовил 650 инженеров-металлургов и 14 кандидатов технических наук, опубликовал более 150 научных трудов объемом около 250 печатных листов, в том числе 5 книг, 10 брошюр, 90 статей. Большая часть из созданных 37 изобретений реализована на металлургических предприятиях и даёт ощутимый экономический эффект. Например: до 1975 г. на 24 доменных печах внедрены вертикально-горизонтальные холодильники, получен годовой экономический эффект около 9 млн. руб. (в ценах 1975 г.).

В.А. Сорокиным опубликованы единоличные монографии: «Устройство, оборудование и эксплуатация доменных печей» (1937, 1939 и 1944 г.г.); «Получение древесного угля в пересыпных печах» (1942 г.); «Комплексная автоматизация доменных печей» (1963 г.).

За доблестный труд В.А. Сорокин имел награды и почётные звания: медаль «За доблестный труд в Великой Отечественной войне»; звание «Заслуженный изобретатель УССР»; диплом почета и бронзовую медаль Выставки достижений народного хозяйства (1970 г.); юбилейную медаль «Тридцать лет победы в Великой Отечественной войне».

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

В.Н. Ульяницкий /к.т.н./
ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет» (Алчевск)

ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ ИСТЕКШИХ ЛЕТ

Кафедра основана в 1966 г. как структурная единица металлургического факультета Коммунарского горно-металлургического института (КГМИ) и до 1996 г. была известна под названием кафедры «Механическое оборудование металлургических заводов» (МОМЗ). В 1996 г. произошло переименование города Коммунарска в Алчевск, а КГМИ в Донбасский государственный технический университет (ДонГТУ).

Появление кафедры такого функционального направления в КГМИ было обусловлено необходимостью подготовки инженеров-механиков для комплектования системы механослужб предприятий металлургической, машиностроительной и других промышленных отраслей народного хозяйства Донбасса.

Первым заведующим и фундатором кафедры (1966-1969 г.г.) был к.т.н., доцент Сергей Маркович Носенко, окончивший с отличием (1940 г.) Днепропетровский металлургический институт. В годы Великой Отечественной войны он вместе с «Запорожсталью» был эвакуирован на Урал, где трудился до победного конца военного лихолетья. Из эвакуации возвратился в Алчевск. До перехода (1959 г.) в молодой вуз трудился на местном металлургическом заводе. Умудренный богатым опытом практической работы в механослужбах металлургических предприятий СССР, Сергей Маркович окунулся в сферу подготовки инженерных кадров для нужд народного хозяйства страны. На первых порах ему было поручено руководить кафедрой «Прикладная механика», а весной 1966 г. Сергей Маркович взялся за организацию новой выпускающей кафедры МОМЗ.

В сжатые сроки была разработана вся необходимая документация для ведения учебного процесса в соответствии с планом подготовки инженеров специальности «Металлургическое оборудование». Неоценимую помощь новой кафедре молодого вуза (основан в 1957 г.) в решении многих вопросов становления и мужания оказали коллективы родственных кафедр Днепропетровского металлургического института (ныне Национальная металлургическая академия Украины) (заведующий кафедрой д.т.н., проф. В.М. Гребеник) и Донецкого политехнического института (ныне ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет») (заведующий кафедрой д.т.н., проф. В Я. Седуш). Не отказывали в просьбах и поддержке такие же кафедры других вузов СССР. Благодаря их вниманию и доброжелательности кафедра МОМЗ ДонГТУ, как говорится, стала «на крыло» и уверенно держится на нем вот уже 50 лет.

На момент образования в составе кафедры трудились пять человек, а уже в конце 1966 г. учебный процесс вели преподаватели С.М. Носенко, А.А. Аксюта, В.Н. Ульяницкий, М.Н. Сухомлин, А.Т. Успенский, а также заведующий лабораторией А.Н. Иваненко и лаборант К.С. Федорушкова.

В связи со структурными изменениями в ДонГТУ (2002 г.) к кафедре МОМЗ была присоединена кафедра «Прикладная механика», и объединенная кафедра стала именоваться кафедрой «Машины металлургического комплекса и прикладная механика» (ММКиПМ).

Первыми выпускниками кафедры (в июне 1967 г.) стали 34 студента-производственника,



Коллектив кафедры ММКиПМ 2002 г.

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org



Коллектив кафедры ММКиПМ 2016 г. (*слева направо*):
профессор Юрий Александрович Харламов; ассистенты Надежда Александровна Бондарь и Дмитрий Алексеевич Власенко; старший преподаватель Елена Сергеевна Козачишена; заведующий кафедрой Дмитрий Александрович Вишневский; заведующий лабораторией Валентина Петровна Гайдукова; доцент Оксана Александровна Левченко; ассистент Родион Юрьевич Коробов; профессор Василий Никифорович Ульяницкий; доценты Павел Григорьевич Терзиян и Юрий Викторович Изюмов; старший преподаватель Павел Александрович Петров; инженеры Галина Александровна Билан и Виктор Сергеевич Носко; доцент Виталий Анатольевич Козачишен

которые трудились на разных производственных участках местного металлургического завода и занимали должности от слесаря-ремонтника до начальника цеха.

За 50-летний период кафедра подготовила для нужд народного хозяйства 3750 специалистов, в т.ч. бакалавров-механиков – 1485 чел., инженеров-механиков – 2183 чел., магистров-механиков – 82 чел.

Коллектив кафедры ММКиПМ гордится своими воспитанниками и поддерживает с ними постоянные благотворные связи. Весьма затруднительно назвать металлургическое предприятие на Украине или просторах СНГ, где бы в разные годы не работали (или не работают сейчас) инженеры-механики – воспитанники кафедры – главные и ведущие специалисты, руководители предприятий, цехов, отделов, производственных участков, особенно служб главного механика. Например, персонал механослужбы ПАО «Алчевский металлургический комбинат» (АМК) практически на 90 % укомплектован выпускниками кафедры.

Следует отметить, что в первые десятилетия становления и развития кафедры к ведению учебного процесса приглашались высококвалифицированные специалисты местного металлургического комбината: главные и ведущие специалисты, руководители механослужбы, работники лабораторий, проектно-конструкторского отдела, центральной лаборатории автоматизации и механизации, производственных участков. Их богатый производственный практический опыт был крепкой основой для усвоения студентами материала специальных и общеинженерных дисциплин.

После ухода из жизни С.М. Носенко кафедру возглавил (1969-1982 г.г.) к.т.н., доцент Михаил Никонович Сухомлин. До перехода в институт он трудился в механослужбе мартеновского цеха металлургического комбината. С 1974 г. начался прием студентов стационарной формы обучения на специальность «Металлургическое оборудование».

С апреля 1982 г. и до мая 2015 г. (с перерывом в 2010-2011 г.г.) кафедрой заведовал к.т.н., профессор, академик Международной академии наук экологии, безопасности человека и природы и Академии Подъемно-транспортных наук Украины, отличник образования Украины Василий Никифорович Ульяницкий.

В период с января 2010 г. по июнь 2011 г. руководил кафедрой к.т.н., доцент Юрий Викторович Изюмов, в настоящее время являющийся деканом факультета металлургического и машиностроительного производства ДонГТУ. В апреле 2015 г. кафедру возглавил ее выпускник 2002 г. к.т.н., доцент Дмитрий Александрович Вишневский.

Уже в первые годы функционирования на кафедре началась научно-исследовательская работа по хоздоговорной тематике с Коммунарским металлургическим комбинатом и Уралмашзаводом (Свердловск, ныне Екатеринбург)

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

касательно исследований возможностей и усовершенствования режущих машин в листопрокатных цехах отрасли. По существу, это направление исследований стало приоритетным для кафедры на многие годы. В дальнейшем сложилось несколько других важных сфер исследований прикладного характера, тесно связанных с совершенствованием технологии и оборудования металлургического производства.

Преподавателями и сотрудниками кафедры выполнено 60 научно-исследовательских работ преимущественно по хоздоговорам с предприятиями металлургической отрасли Донбасса. Результаты большинства научных исследований внедрены в производство металлургических комбинатов.

Результаты исследований явились основой для написания и защиты 17 кандидатских диссертаций персоналом кафедры. Готовит к защите докторскую диссертацию к.т.н., доцент П.В. Боровик.

Преподавателями и сотрудниками кафедры подготовлено и опубликовано в различных специализированных изданиях более 1500 научных и учебно-методических трудов, получено около 200 патентов и авторских свидетельств на изобретения. Многие научные разработки кафедры внедрены в производство, нашли применение в учебных пособиях и монографиях, 20 из которых имеют гриф Министерства образования и науки Украины.

Кафедра поддерживает творческие связи со многими промышленными предприятиями, проектными организациями, научно-исследовательскими учреждениями и учебными заведениями металлургического профиля. Особенно следует отметить тесные связи с механослужбой АМК, ПАО «Алчевсккокс», ПАО «Енакиевский металлургический завод», для которых выполняются разработки по усовершенствованию оборудования основных цехов и снижения нагрузки на окружающую среду территорий, прилегающих к этим предприятиям.

В настоящее время кафедра имеет благотворные связи с родственными высшими учебными заведениями Донбасса, Российской Федерации, Украины, Беларуси.

Большую поддержку и помощь кафедре ММКиПМ, как и родственным кафедрам других вузов СССР при их становлении оказывали периодические совещания-семинары заведующих кафедрами механического оборудования металлургических предприятий некогда нашей общей Великой страны – Советского Союза. На семинарах обсуждались проблемы совершенствования учебных планов специальности и рабочих программ дисциплин – основы подготовки инженеров-механиков. Упомянутые кафедры вели подготовку инженеров-механиков для предприятий горно-металлургического комплекса страны более чем в 20 вузах СССР. Их объединяли неразрывные творческие и гуманитарные связи.



Участники Всесоюзного семинара заведующих кафедрами механического оборудования металлургических заводов 17-25 мая 1985 г. в Днепропетровском металлургическом институте (*слева направо*): *в первом ряду* – Д.П. Притыкин, В.Я. Седуш, В.В. Татарников, А.В. Трушин, В.М. Гребеник, А.В. Гордиенко, В.С. Паршин, Г.П. Герасименко; *во втором ряду* – А.Г. Навроцкий, К.Б. Досунов, И.И. Леепа, А.И. Сапко, Ю.В. Жиркин, И.Л. Баклушин, Ю.А. Епифанцев, Е.Н. Березин; *в третьем ряду* – В.П. Усачев, В.Ф. Атаманов, В.Н. Ульяницкий, В.Н. Цупров

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, НАПРАВЛЯЕМЫМ В РЕДАКЦИЮ

1. Основной текст статьи должен содержать такие необходимые элементы, выделенные заголовками, как:

– **постановка проблемы** в обобщенном виде и ее связь с важными научными или практическими задачами;

– **анализ последних исследований и публикаций**, в которых начато решение данной проблемы и на которые опираются авторы, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена данная статья;

– формулировка **цели (задачи) исследования**;

– изложение **основного материала исследования** с полным обоснованием полученных научных результатов;

– **выводы** по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

2. Статья, основной текст вместе с рисунками и др. нетекстовыми элементами, должна быть объемом **5…8 полных** страниц формата А4 (210×297 мм) с полями **20** мм с каждой стороны. Рукопись статьи необходимо оформлять с помощью редактора MS Word. Шрифт – Times New Roman, **12** пт, стиль – обычный. Межстрочный интервал – одинарный. Расстановка переносов – автоматическая. Выравнивание – по ширине страницы. Страницы не нумеровать.

3. Структура статьи (каждый элемент с новой строки): код УДК; инициалы и фамилии авторов с указанием ученой степени каждого (количество авторов **не более 3-х** от одной организации); название организации, город, где работают авторы; название статьи; аннотация на русском языке (объемом **не более 300** символов); ключевые слова (**от 3 до 5**); основной текст статьи; список литературы. Сокращение слов в тексте, рисунках и таблицах не допускается.

В аннотации на русском языке сжато излагается формулировка задачи, которая решена в статье, и приводятся полученные основные результаты.

В конце статьи, после списка литературы приводятся инициалы и фамилии авторов, ученые степени, организации, города, название статьи, аннотация и ключевые слова на английском языке

Аннотация на английском языке должна представлять собой резюме, призванное выполнять функцию независимого от статьи источника информации. Резюме должно быть информативным (не содержать общих слов), оригинальным (не являться калькой аннотации на других языках), содержательным (отражать основное содержание статьи и результаты исследований), структурированным (следовать логике описания результатов в статье), компактным, но не коротким (объемом **от 250 до 300** слов). Типичная структура резюме: состояние вопроса (**Background**); материалы и/или методы исследования (**Materials and/or methods**); результаты (**Results**); заключение (**Conclusion**).

Внимание! Убедительная просьба не разбивать текст на колонки, как это сделано в журнале, т к. это усложняет редакторскую обработку статьи!

4. **Обязательным условием** является наличие в статье графического материала (рисунков, графиков, схем, фотографий), размером **не менее 80×80** мм, в формате *.tif или *.jpg, разрешением **не менее 300** dpi. Графический материал внедренными объектами размещается по тексту после первого упоминания, не разрывая текста абзаца. Все позиции, обозначенные на рисунках, должны быть объяснены в тексте. Под каждым рисунком указывается его порядковый номер и название (выравнивание по центру страницы, без точки в конце). Рисунки должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу.

Внимание! Запрещается внедрять графические материалы в виде объектов, связанных с др. программами, например, с КОМПАС, MS Excel и т п. Рисунки, выполненные непосредственно в MS Word не принимаются.

5. Математические формулы необходимо выполнять с помощью редактора формул **MS Equation Editor 3.0** в соответствии со следующими размерами: обычный символ – **11** пт; крупный индекс – **7** пт; мелкий индекс – **5** пт; крупный символ – **13** пт; мелкий символ – **8** пт.

Все величины, входящие в формулы, должны быть объяснены в тексте. Формулы должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу. Формулы выполняются курсивом, **кроме цифр и символов греческого алфавита**. Формулы нумеруются (справа в круглых скобках, не отступая от формулы) **только в том случае**, если в тексте на них имеются ссылки.

Внимание! Количество формул в статье **не более 5**. Запрещается выполнять формулы с помощью MathCAD или др. аналогичных программ.

6. Таблицы должны иметь порядковый номер и название (выравнивание по центру страницы, без точки в конце) и располагаться по тексту после первого упоминания, не разрывая текста абзаца. Таблицы должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу.

7. **Обязательным условием** является наличие в статье списка литературы, который приводится после выводов через один интервал (пустую строку) под заголовком **Список литературы**. Перечень ссылок должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу по тексту заключаются в квадратные скобки. В списке литературы должно быть **не менее 3-х** публикаций, вышедших **за последние 5** лет, а также **не менее 3-х** зарубежных (англоязычных) публикаций.

Для принятия решения о публикации статьи в журнале, в адрес редакции необходимо выслать:

– сопроводительное письмо (с указанием, что статья ранее нигде не публиковалась) от организации, где работают авторы и сведения об авторах статьи;

– электронный вариант статьи (имя файла составляется из фамилий авторов, например, ИвановПетров.doc) и сведений об авторах (имя файла – ИвановПетров_sved.doc).

В сведениях об авторах для каждого соавтора обязательно должен быть указан адрес персональной эл. почты.

Для ускорения подготовки очередных номеров журнала, просьба передавать сопроводительное письмо в отсканированном виде, электронный вариант статьи и сведения об авторах по эл. почте на адрес: **0713019870@mail ru**

Внимание! Убедительная просьба, проверить получение редакцией материалов любым из способов (по телефону **+380 (66) 029-44-30** или эл. почте **0713019870@mail ru**).

Редакция оставляет за собой право возвращать статьи авторам на доработку в следующих случаях: статья небрежно оформлена и не соответствует требованиям редакции журнала, приведенным выше; статья требует доработки в соответствии с замечаниями рецензента и редакторов; отсутствует сопроводительное письмо от организации, где работают авторы или сведения об авторах.

Требования к рекламно-информационным материалам, публикация которых оплачивается, согласовываются непосредственно с редакцией журнала.

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

NDT
RUSSIA

ufi Approved Event

25–27 октября 2016

Москва
Крокус Экспо

16-я Международная выставка оборудования для неразрушающего контроля и технической диагностики



0+

Организаторы:

primexpo ITE

+7 (812) 380 6002/00
ndt@primexpo.ru

Получите электронный билет:
ndt-russia.ru

Донецкий национальный технический университет (ДонНТУ) – родоначальник инженерного образования в Донбассе, признанное в мире высшее учебное заведение, активно осуществляющее международное научно-техническое сотрудничество с более чем 80 известными университетами из 25-ти стран мира и 32 иностранными фирмами, являющееся членом 24-х ведущих международных образовательных ассоциаций.

С момента основания в 1921 году старейший технический вуз Донбасса подготовил свыше 230 тысяч инженерно-технических кадров различной квалификации, из которых: **160 тысяч** – специалисты и магистры, **60 тысяч** – бакалавры, **15 тысяч** – младшие специалисты; около **2,5 тысяч** иностранных студентов из 70-ти стран мира.

Основные задачи ДонНТУ на 2016-й год:

1) Восстановление контингента студентов.
2) Восстановление количественных и качественных показателей преподавательского состава.
3) Восстановление и развитие материально-технической базы.
4) Поиск и реализация инновационных путей развития.
5) Укрепление репутации ДонНТУ как важнейшего в Донбассе и одного из наиболее значительных на всем русскоязычном пространстве научно-образовательных центров технического направления.

ДонНТУ уверенно смотрит в будущее и достойно, с новыми достижениями, встретит свой 95-летний юбилей в 2016 году!



Адрес главного 1-го корпуса: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58
Интернет: http://donntu.org; http://science.donntu.org

Ректор: +380 (62) 337-17-33
Справка: +380 (62) 301-07-09
Канцелярия: +380 (62) 301-07-69
Приемная комиссия: +380 (62) 301-08-89

Научно-исследовательская часть: +380 (62) 304-60-82
Центр карьеры и общественных коммуникаций: +380 (62) 334-28-35
Издательство «Донецкая политехника»: +380 (62) 304-92-51