

## СОДЕРЖАНИЕ

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор  
**Б. Е. Патон**

М. И. Гасик,  
Г. М. Григоренко  
(зам. гл. ред.),  
Д. М. Дяченко (отв. секр.),  
М. Л. Жадкевич,  
В. И. Лакомский,  
**В. К. Лебедев**, Л. Б. Медвар,  
Б. А. Мовчан, А. Н. Петрунько,  
Н. П. Тригуб, А. А. Троянский,  
В. А. Шаповалов

### МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Д. Аблизер (Франция)  
Г. М. Григоренко (Украина)  
Б. Короушич (Словения)  
С. Ф. Медина (Испания)  
А. Митчелл (Канада)  
Б. Е. Патон (Украина)  
Ц. В. Рашев (Болгария)  
Ж. Фокт (Франция)  
Е. Х. Шапзапов (Россия)  
Т. Эль Гаммаль (Германия)

### Адрес редакции:

Украина, 03680, г. Киев-150,  
ул. Боженко, 11  
Институт электросварки  
им. Е. О. Патона НАН Украины  
Тел./факс: (38044) 528 34 84,  
529 26 23  
Тел.: (38044) 271 22 07  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj

### Редактор:

В. И. Котляр  
Электронная верстка:  
Д. М. Дяченко,  
Л. Н. Герасименко,  
И. С. Баташева

Свидетельство  
о государственной регистрации  
КВ 6185 от 31.05.2002

Журнал входит в перечень  
утвержденных ВАК Украины  
изданий для публикации трудов  
соискателей ученых степеней

При перепечатке материалов  
ссылка на журнал обязательна.  
За содержание рекламных  
материалов редакция журнала  
ответственности не несет

К 75-летию ОАО «Украинский графит»

Развитие научно-производственной базы при изготовлении электродной  
продукции на ОАО «Украинский графит» ..... 3

### ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

**Жадкевич М. Л., Шевцов В. Л., Пузрин Л. Г.** Электрошлаковое литье  
полых слитков и заготовок в промышленном производстве (Обзор) ..... 7

**Скрипник С. В., Чернега Д. Ф., Горячек А. В.** Исследование качества  
конусных заготовок из стали 20X13, полученных способом центробежного  
электрошлакового литья ..... 15

**Цыкуленко К. А., Вислобоков О. М.** Физическое моделирование  
гидродинамики шлаковой ванны в слябовом токоподводящем  
кристаллизаторе. Часть 2. Наплавка ..... 18

### ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ

**Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Жук Г. В., Березос В. А.** Развитие  
электронно-лучевой плавки титана в ИЭС им. Е. О. Патона ..... 22

**Тугай Б. А.** Автоматическое управление током газоразрядной  
электронной пушки с холодным катодом ..... 25

**Яковчук К. Ю., Дидикин Г. Г., Романенко С. М., Литвин С. Е.,  
Скрябинский В. В., Маринский А. Г.** Конденсационные эрозионно-стойкие  
покрытия на основе карбида бора ..... 33

**Савенко В. А., Гречанюк Н. И., Чураков О. В.** Электронно-лучевое  
рафинирование платины и сплавов на ее основе. Сообщение 2.  
Электронно-лучевое рафинирование сплавов на основе платины ..... 38

### ПЛАЗМЕННО-ДУГОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

**Шаповалов В. А., Никитенко Ю. А., Мельник А. С.** Тепловое состояние  
барабана-холодильника плазменно-дуговой установки в процессе сверхбыстрой  
закалки расплава ..... 42

### ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ СТАЛИ И ФЕРРОСПЛАВОВ

**Панченко А. И., Логозинский И. Н., Сальников А. С., Мазурук С. Л.,  
Касьян С. С., Казаков С. С., Скрипка Л. М., Гасик М. И., Горобец А. П.,  
Сезоненко О. Н.** Разработка и освоение технологии раскисления  
и легирования подшипниковой стали ШХ15СГ-В ферросилико-  
марганцем MnC25 ..... 47

**Троянский А. А., Сняжков Р. В.** Идентификация технологических  
событий при выплавке стали в дуговой сталеплавильной печи  
с использованием вейвлет-анализа ..... 58

### ИНФОРМАЦИЯ

**Липодаев В. Н.** Выставка «Сварка. Родственные технологии - 2008» ..... 63

**Ахонин С. В.** Международная конференция «Ti-2008 в СНГ» ..... 65

**Сняж О. Д.** IX Международная конференция-выставка  
«Проблемы коррозии и противокоррозионная защита конструкционных  
материалов» — «Коррозия-2008» ..... 66

О. А. Троянскому — 60 ..... 67

Н. Т. Шевченко — 70 ..... 67

Памяти Арсениюка Валерия Васильевича ..... 68

Памяти академика В. К. Лебедева ..... 68

### ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ



ОАО «Украинский графит»

Научно-производственный центр «ТИТАН»

КП «Запорожский титано-магниевого комбинат»

**SOVREMENNAYA  
ELEKTROMETALLURGIYA**  
(Electrometallurgy Today)

**Nº 3 (92)**

**2008**

Published since January, 1985

**Founders:** The National Academy of Sciences of Ukraine  
The E. O. Paton Electric Welding Institute  
International Association «Welding»

**Publisher:** International Association «Welding»

Is published 4 times a year

**EDITORIAL BOARD:**

Editor-in-Chief

**B. E. Paton**

M. I. Gasik,

G. M. Grigorenko (vice-chief ed.),  
D. M. Dyachenko (exec. secr.),  
M. L. Zhadkevich, V. I. Lakomsky,  
V. K. Lebedev, L. B. Medovar,  
B. A. Movchan, A. N. Petrunko,  
N. P. Trigub, A. A. Troyanskii,  
V. A. Shapovalov

**THE INTERNATIONAL  
EDITORIAL COUNCIL:**

D. Ablitzer (France)  
G. M. Grigorenko (Ukraine)  
B. Koroushich (Slovenia)  
S. F. Medina (Spain)  
A. Mitchell (Canada)  
B. E. Paton (Ukraine)  
Ts. V. Rashev (Bulgaria)  
J. Foct (France)  
E. H. Shahpazov (Russia)  
T. El Gammal (Germany)

**Address:**

The E. O. Paton Electric  
Welding Institute  
of the NAS of Ukraine,  
11, Bozhenko str., 03680,  
Kyiv, Ukraine  
Tel./fax: (38044) 528 34 84,  
529 26 23  
Tel.: (38044) 271 22 07  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj

**Editor:**

V. I. Kotlyar  
Electron galley:  
D. M. Dyachenko, L. N. Gerasimenko,  
I. S. Batasheva

State Registration Certificate  
KV 6185 of 31.05.2002

All rights reserved.

This publication and each of the  
articles contained here in are  
protected by copyright

Permission to reproduce material  
contained in this journal must be  
obtained in writing from the Publisher

**CONTENTS**

*Towards the 75th-anniversary of OJSC «Ukrainian Graphite»  
Development of research-production facility in manufacture of  
electrode products at the OJSC «Ukrainian Graphite» ..... 3*

**ELECTROSLAG TECHNOLOGY**  
**Zhadkevich M. L., Shevtsov V. L., Puzrin L. G.** Electroslag  
casting of hollow ingots and billets in industrial production  
(Review) ..... 7  
**Skrupnik S. V., Chernega D. F., Goryachek A. V.** Investigation of  
quality of conic billets of steel 20Kh13, produced by the method of  
centrifugal electroslag casting ..... 15  
**Tsykulyenko K. A., Vislobokov O. M.** Physical modeling of  
hydrodynamics of slag pool in a slab current-carrying mould.  
Part 2. Cladding ..... 18

**ELECTRON BEAM PROCESSES**  
**Paton B. E., Trigub N. P., Zhuk G. V., Berezos V. A.** Progress  
of electron beam melting of titanium at the E. O. Paton Electric  
Welding Institute ..... 22  
**Tugaj B. A.** Automatic control of current of gas-discharge electron  
beam gun with a cold cathode ..... 25  
**Yakovchuk K. Yu., Didikin G. G., Romanenko S. M.,  
Litvin S. E., Skryabinsky V. V., Marinsky A. G.** Condensation  
erosion-resistant boron carbide-based coatings ..... 33  
**Savenko V. A., Grechanyuk N. I., Churakov O. V.** Electron beam  
refining of platinum and alloys on its base. Report 2. Electron beam  
refining of platinum-based alloys ..... 38

**PLASMA-ARC TECHNOLOGY**  
**Shapovalov V. A., Nikitenko Yu. A., Melnik A. S.** Thermal state  
of drum-cooler of plasma-arc installation in the process of a  
super-rapid quenching of melt ..... 42

**ELECTROMETALLURGY OF STEEL AND FERROALLOYS**  
**Panchenko A. I., Logozinsky I. N., Salnikov A. S.,  
Mazuruk S. L., Kasyan S. S., Kazakov S. S., Skripka L. M.,  
Gasik M. I., Gorobets A. P., Sezonenko O. N.** Development and  
mastering of technology of deoxidizing and alloying of bearing steel  
ShKh15SG-V by ferro-silico-manganese MnS25 ..... 47  
**Troyansky A. A., Sinyakov R. V.** Identification of technological  
events during steel melting in arc steel-making furnace using a  
wavelet-analysis ..... 58

**INFORMATION**  
**Lipodaev V. N.** Exhibition «Welding. Related Technologies-2008» ..... 63  
**Akhonin S. V.** International Conference «Ti-2008 in CIS» ..... 65  
**Smiyan O. D.** The IX International Conference-Exhibition  
«Problems of corrosion and anti-corrosion protection of structural  
materials» — «Corrosion-2008» ..... 66  
O. A. Troyansky is 60 ..... 67  
N. T. Shevchenko is 70 ..... 67  
In memory of V. V. Arsenyuk ..... 68  
In memory of V. K. Lebedev ..... 68

*Journal «Sovremennaya Elektrometallurgiya»  
is published in English under the title  
«Advances in Electrometallurgy» by the E. O. Paton Electric Welding Institute.  
Concerning publication of articles, subscription and advertising, please,  
contact the editorial board*

## РАЗВИТИЕ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БАЗЫ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОДУКЦИИ НА ОАО «УКРАИНСКИЙ ГРАФИТ»

Анализ параметров свойств электродов свидетельствует о том, что мировая тенденция совершенствования чрезвычайно энергоемкого электродугового или электролизного производства состоит в увеличении электрического тока, протекающего через электрод. При протекании тока минимизации тепловых потерь достигают за счет уменьшения удельного электрического сопротивления (УЭС) собственно электрода. Так, современные ведущие производители электродной продукции гарантируют УЭС графитированных электродов на ток 100... 140 кА в диапазоне 4,0... 5,5 мкОм·м. Технико-экономический анализ показывает, что снижение УЭС электродов на 0,2 мкОм·м позволяет уменьшить энергопотери приблизительно на 6... 8 % на тонну металла.

Необходимо подчеркнуть, что технико-экономическая информация в производстве углеграфитовой продукции является во многих разделах закрытой и сугубо конфиденциальной. С другой стороны, проблема выпуска качественных электродов касается стратегически важных секторов отечественной

экономики, в частности металлургического и энергетического.

В середине 1990-х гг. анализ ситуации по выпуску качественной продукции на ОАО «Укрграфит» показал, что для повышения качества продукции и ее конкурентоспособности необходимо провести комплекс системных научно-технических работ, направленных на совершенствование как технологий, так и производственной базы. С этой целью руководство завода утвердило комплексный план проведения инновационных работ по созданию конкурентоспособной продукции. Главными факторами, предшествующими этой работе, были следующие:

анализ общих тенденций развития электродной отрасли ведущих стран, показавший, что они базируются на фундаментальных и всесторонних научных исследованиях физических свойств исходных материалов, изучении процессов при производстве электродной продукции, внедрении в практику индексов контроля качества конечной продукции;

всесторонний маркетинговый анализ сырья, ценовой политики, тенденций развития рынка, требо-

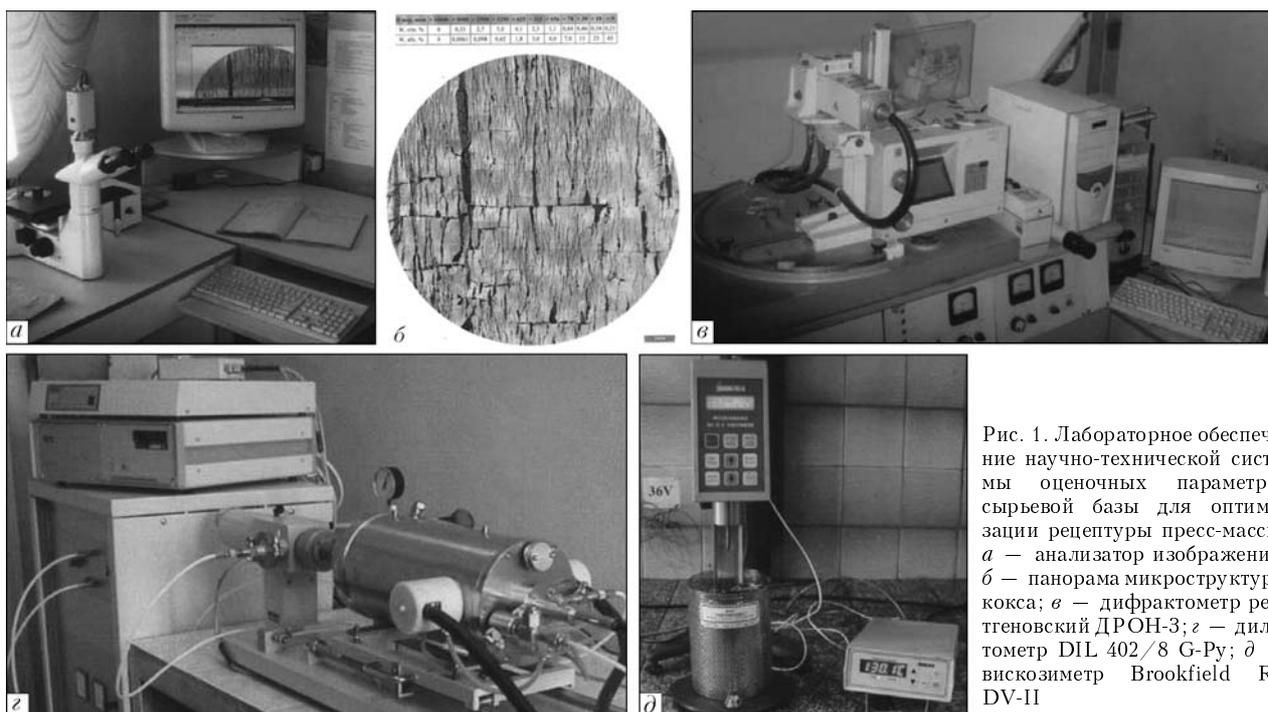


Рис. 1. Лабораторное обеспечение научно-технической системы оценочных параметров сырьевой базы для оптимизации рецептуры пресс-массы: а — анализатор изображения; б — панорама микроструктуры кокса; в — дифрактометр рентгеновский ДРОН-3; г — дилатометр DIL 402/8 G-Py; д — вискозиметр Brookfield RV DV-II

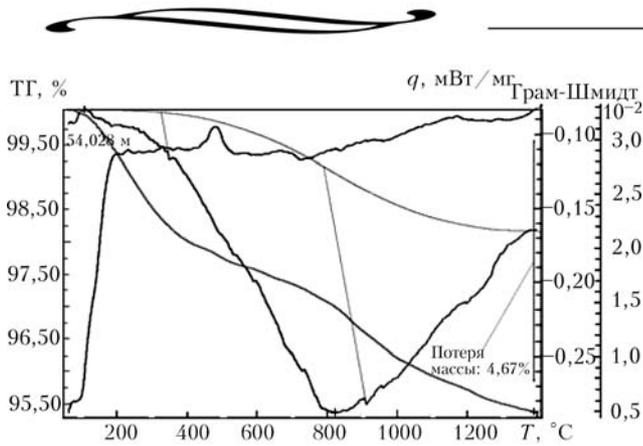


Рис. 2. Термокинетические параметры кальцинации антрацита

ваний потребителей электродной продукции, определение масштабов и направлений инноваций; разработка плана научно-технической модернизации производства с учетом необходимости выпуска широкого ассортимента продукции. В итоге, главная цель работ заключалась в создании современного сквозного технологического цикла, позволившего бы получать изделия, уровень качества которых отвечал бы мировым стандартам. Указанную цель можно достичь путем системного широкомасштабного внедрения в заводскую практику научных тенденций и подходов к производству. Это продиктовано в первую очередь диапазоном номенклатуры изделий и географией потребителей продукции, изготавливаемой на заводе. Области технического применения продукции включают катодные блоки алюминиевых электролизеров, аноды и брусья магниевых электролизеров, высокотемпературную футеровку агрегатов черной металлургии, электроды дуговых плавильных агрегатов, набивные массы и комплектующие к электродной продукции. Соблюдение параметров указанных изделий и технологии их производства требует довольно высокого уровня научных и технических навыков и знаний, которыми должны владеть инженерно-технические работники завода.

Однако ряд вопросов и научно-технических проблем требовалось решать с помощью современных компьютерных и лабораторных средств научных организаций и подразделений. Причинами

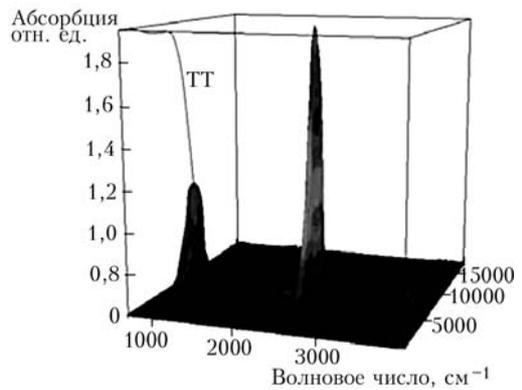


Рис. 3. ИК-диаграмма газовой выделения при кальцинации антрацита

привлечения отечественных научных кадров к решению технических заданий совершенствования производства были уникальность условий протекания технологических процессов (до 2500 °С) и собственно материальных потоков с разнообразной структурой и свойствами; отсутствие отечественных отраслевых лабораторий углеродно-графитового производства; необходимость использования методик и средств исследования, не имеющих аналогов в заводской практике.

Таким образом, был создан творческий коллектив, в который вошли ведущие специалисты завода, Института электросварки им. Е. О. Патона, НПП «Милитекс», Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт» и Национальной металлургической академии Украины. Удачное сочетание менеджмента и научно-технического подхода к решению проблемы позволило получить научные и технические результаты.

Предложена научно обоснованная система оценочных параметров сырьевой базы для оптимизации рецептуры прессовой массы по данным физических свойств исходных сырьевых материалов: коэффициентов температурного расширения, прочности, упругости, адсорбции, микроструктуры кокса, реологических характеристик пеков и т.д.

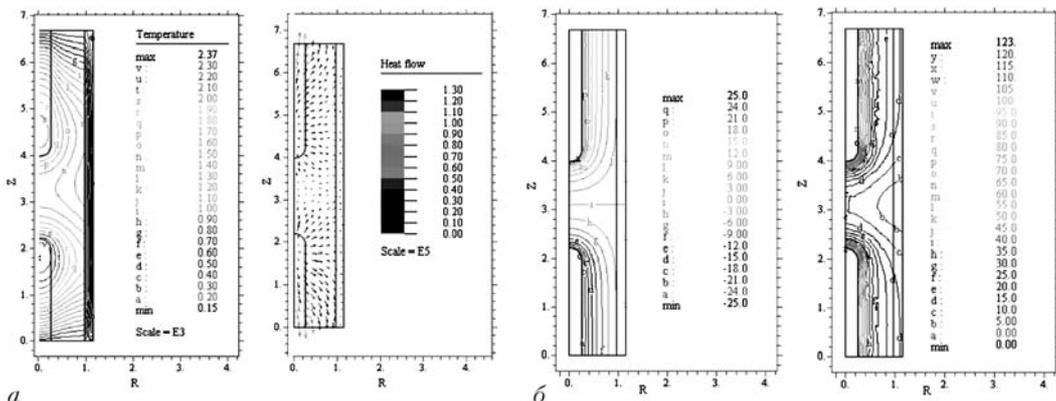


Рис. 4. Компьютерное моделирование тепловых (а) и электрических (б) параметров электрокальцинаций

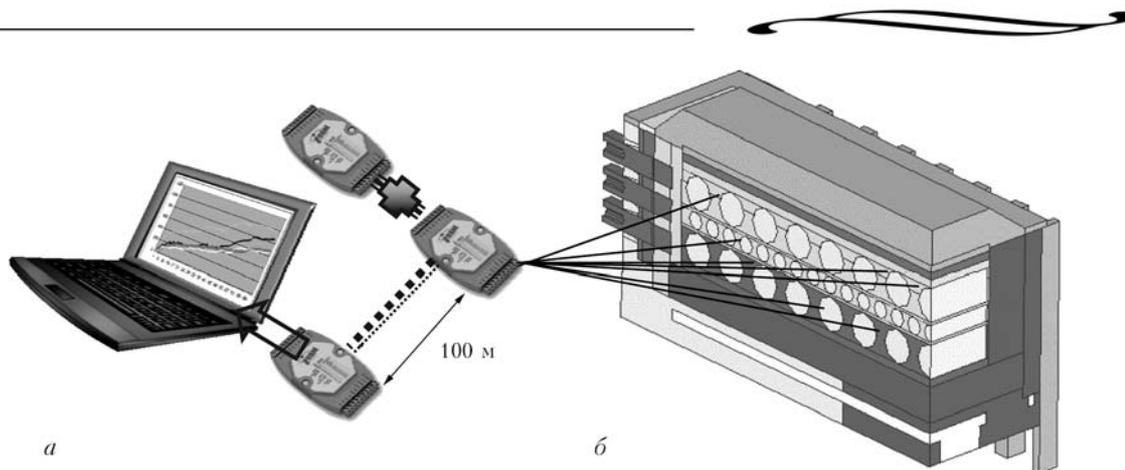


Рис. 5. Мониторинг температурного поля печи графитации: *а* — приборно-программный интерфейс для сбора и записи информации; *б* — термодатчики в печи устанавливаются по разработанной схеме

текания электрического тока сквозь насыпной слой антрацита.

На базе фундаментальных исследований физических процессов в гранулированных углеродных материалах, структурных превращений и изменения термодинамических характеристик антрацита впервые предложена научная концепция одностадийной электрокальцинации антрацита с применением дроссельной шайбы, которая обеспечивает достижение температур кальцинации за счет повышения плотности тока при одновременном уменьшении удельных расходов электроэнергии.

Впервые получены данные термокинетических исследований при прокатке донецкого антрацита и определено влияние теплового эффекта реакций на эффективную мощность электрокальцинатора.

Создана численная термоэлектрическая модель печи электрокальцинатора с использованием обобщенных физических свойств насыпного слоя донецкого антрацита, с помощью которой впервые получены данные по распределению электрического потенциала и плотности тока, температуры и плотности теплового потока при двух- и одностадийной кальцинации антрацита.

Расчетно-экспериментальное исследование электрокальцинатора приведено на рис. 2–4.

Впервые на базе научно обоснованных методик получены экспериментальные данные (в интервале температур до 2500 °С), что существенно изменило представление о характере распределения темпера-

тур рабочей зоны печи графитации в пространстве и во времени.

Создана трехмерная численная теплоэлектрическая модель печи графитации с использованием полученной информации о физических свойствах материалов, которая прошла верификацию по данным натурных экспериментов. Впервые получены трехмерные теплоэлектрические поля печей графитации, значительно расширившие физические представления об условиях протекания технологического процесса; данные по мгновенному и итоговому энергобалансу, что определило потенциал и направление энергосбережения при графитации электродов.

На рис. 5 и 6 показаны стадии экспериментально-расчетного исследования температурных режимов печей графитации.

Итогами многолетней работы стали внедрение следующих подходов и мероприятий. С помощью разработанного новейшего лабораторного оборудования и научно-технических методов анализа свойств исходных материалов внедрен системный подход к выбору сырьевой базы, что позволяет свести к минимуму влияние колебаний рынка поставок сырья; на основании научных обобщений и исследований внедрена одностадийная электрокальцинация антрацита в составе семи электрокальцинаторов мощностью 1600 кВт·А; внедрена автоматизированная система дозирования компонентов наполнителя с обеспечением необходимой точности воспроизводимости технологии; выполнена модернизация переработки пресс-массы для изготовления заготовок

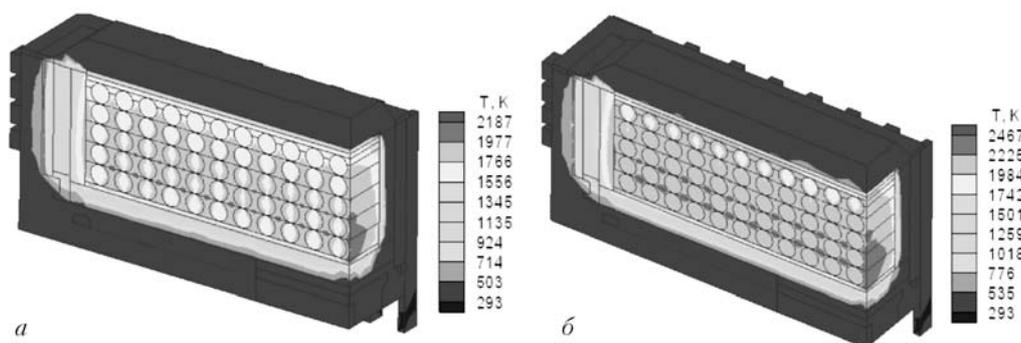


Рис. 6. Компьютерное моделирование температурного поля печи графитации: *а* —  $T_{\min} = 961$  К;  $T_{\max} = 1925$  К; *б* —  $T_{\min} = 1436$  К;  $T_{\max} = 2247$  К



Рис. 7. Обжиговая печь нового поколения (печь № 7)

электродов способом экструзии; осуществлена модернизация термической обработки углеродных заготовок в печах обжига (термической обработки) нового поколения; переоборудован участок переработки кокса путем внедрения технологии прокалики; усовершенствован процесс графитации углеродных заготовок в высокотемпературных печах. На основании выполненных научно-технических исследований тепловых режимов печей обжига построена новая печь № 10 производственной мощностью более 2000 т обожженной продукции за месяц, которая выводит производство на ведущее место на рынке электродной продукции; проведен комплекс работ по научному сопровождению регламентов работы печей обжига; опытные кампании сопровождались компьютерным мониторингом температурных полей, что дало возможность оперативно отслеживать наладочный регламент пуска печи № 10.

Внедрено производство новых графитированных (ПБ-5, ПБ-7) и графитизированных (ПБГ-2)

подовых блоков алюминиевых электролизеров с уменьшенным удельным электрическим сопротивлением для электролизеров на ток до 320 кА.

Разработана уникальная установка для определения теплофизических свойств насыпных материалов до 1750 °С.

В результате внедрения комплекса инновационных разработок достигнуты такие результаты:

расход электроэнергии на одну кампанию печи уменьшился на 8 % при заданных показателях качества графитированной продукции;

повысился процент графитированных электродов (до 96 %), удельное электросопротивление которых отвечает мировым образцам;

за счет интенсификации графика подвода мощности печи графитизации увеличился выпуск продукции на 15... 20 %.

Необходимо также отметить поступательный процесс по интенсификации как научной составляющей исследований, так и их технической реализации.

За прошлый год защищена одна и подготовлена к защите еще одна кандидатские диссертации, опубликованы две монографии и девять статей, получено 10 патентов.

Таким образом, проведенные работы и их содержание свидетельствуют о заметной научной и технической перспективе, что может рассматриваться как становление отечественной научной школы по обеспечению электродного производства.

ОАО «Украинский графит», Запорожье

Поступила 18.07.2008

### *Дорогие коллеги и друзья!*

*За 75 лет «Украинский графит» прошел славный путь и сегодня – это коллектив единомышленников, приумножающий успехи, заложенные теми, кто создавал комбинат и развивал его в течение всех этих лет.*

*Примите искренние сердечные поздравления с замечательной датой – 75-летием прославленного ОАО «Украинский графит»! От всей души желаем процветания, новых творческих успехов и достижений.*

*Редакция и редколлегия  
Журнала «Современная электрометаллургия»*



УДК 669.187.56.001.1

## ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЕ ЛИТЬЕ ПОЛЫХ СЛИТКОВ И ЗАГОТОВОК В ПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ (Обзор)

М. Л. Жадкевич, В. Л. Шевцов, Л. Г. Пузрин

Рассмотрены получившие применение в промышленности способы изготовления полых слитков и заготовок путем электрошлакового литья (ЭШЛ). Проведена систематизация способов ЭШЛ по особенностям взаимного перемещения наружного и внутреннего кристаллизаторов и выплавляемой заготовки. Выполнен анализ возможностей, преимуществ и недостатков различных способов ЭШЛ полых заготовок и принципов управления процессом перемещения кристаллизаторов. Приведены примеры эффективного использования в промышленности полученных ЭШЛ полых слитков и заготовок, предназначенных для последующей деформации или применения в литом виде.

Methods of manufacture of hollow ingots and billets by electroslag casting (ESC), widely spread in industry, are considered. Systematization of ESC methods is made by specifics of mutual displacement of external and internal moulds and billet being melted. Capabilities, advantages and drawbacks of different methods of ESC of hollow billets and principles of control of moulds displacement process are analyzed. Examples of effective application in industry of hollow ingots and billets, produced by ESC and designed for next deformation or application in a cast form, are given.

**Ключевые слова:** электрошлаковое литье; полый слиток (заготовка); наружный, внутренний (дорн) кристаллизатор; регулирование уровня жидкого металла; виды полых заготовок

Полые заготовки из сталей и сплавов широко применяются в современной промышленности для производства путем прокатки, прессования или радиальнойковки бесшовных труб различного сортамента, а также для изготовления горячей и холодной раскаткой разнообразных колец и тонкостенных обечаек. Использование таких заготовок позволяет значительно упростить технологию получения готовых изделий. Сами полые заготовки производят с использованием механической обработки, горячей высадки или прошивки центральной части слитка сплошного сечения. Полые заготовки под раскатку получают также центробежным литьем.

Развитие электрошлаковой технологии привело к созданию способов получения полых заготовок непосредственно в процессе переплава. Эти заготовки предназначались для дальнейшего передела в изделия с особо высокими эксплуатационными свойствами. При производстве бесшовных труб и обечаек полая заготовка избавляет от операции прошивки монолитного электрошлакового слитка, что компенсирует затраты на электрошлаковый переплав (ЭШП) и дает возможность изготавливать трубы из сталей и сплавов, трудно поддающихся про-

шивке. Во многих случаях электрошлаковые полые заготовки можно использовать в литом виде без дальнейшей деформации, поскольку литой электрошлаковый металл не уступает в прочности деформированному металлу обычного производства, но

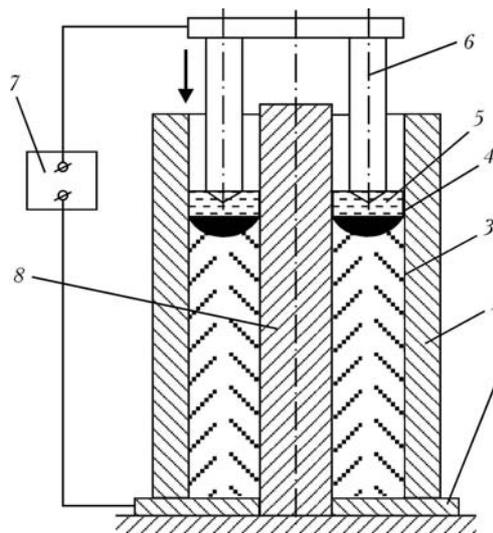


Рис. 1. Схема выплавки полых заготовок с неподвижным внутренним кристаллизатором: 1 — поддон; 2 — наружный кристаллизатор; 3 — заготовка; 4 — металлическая ванна; 5 — шлаковая ванна; 6 — расходный электрод; 7 — источник питания; 8 — внутренний кристаллизатор (дорн)

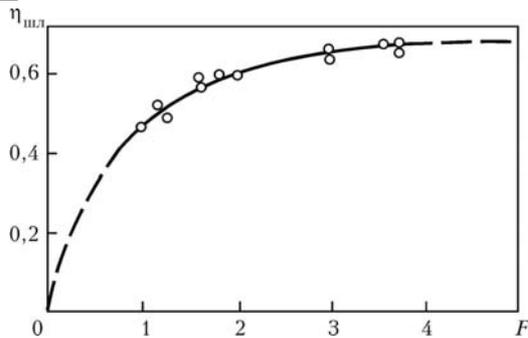


Рис. 2. Зависимость относительных потерь теплоты от шлаковой ванны  $\eta_{шл}$  от параметра  $F$

заметно превосходит его по пластичности и вязкости [1, 2].

Для формирования полости в электрошлаковом слитке внутрь кристаллизатора вводят дополнительную охлаждаемую поверхность, так называемый внутренний кристаллизатор или дорн. В этом случае процесс ЭШП осуществляют в пространстве между наружным и внутренним кристаллизаторами (рис. 1).

При выплавке полого слитка увеличивается площадь контакта расплавленного шлака со стенками кристаллизаторов, что приводит к повышенной потере теплоты, которая отбирается охлаждающей водой непосредственно от шлаковой ванны. Для компенсации этой потери при выплавке полого слитка выделяемая в шлаке удельная мощность должна быть больше, чем при выплавке сплошного слитка такого же наружного диаметра. Причем, чем меньше толщина стенки полого слитка, тем больше следует увеличивать удельную мощность. Относительные потери теплоты от шлаковой ванны к охлаждающей воде при выплавке полых слитков любых типоразмеров можно оценить исходя из рис. 2. С помощью безразмерного коэффициента  $F$ , равного отношению суммарной площади контакта расплавленного шлака с охлаждаемыми стенками к площади зеркала металлической ванны, можно определить долю теплоты, отбираемой охлаждающей водой непосредственно от шлака, на которую следует увеличивать подводимую мощность [3].

Кроме повышенных тепловых потерь от шлаковой ванны при выплавке полых слитков имеет место дополнительный теплоотвод к дорну от переплавленного металла. Усадка выплавляемого слитка приводит к обжатию им дорна. Поэтому характер изменения теплоотвода от наружной и внутренней поверхности затвердевающего полого слитка существенно отличается. По мере удаления от зеркала металлической ванны теплоотдача слитка к наружному кристаллизатору уменьшается вследствие увеличения зазора между ними, а к внутреннему — возрастает [3].

В связи с более интенсивным теплоотводом металл полого слитка кристаллизуется с большим переохлаждением, чем металл сплошного слитка такого же наружного диаметра [4, 5]. Это приводит к получению более мелкозернистой первичной структуры, а также к повышенным и стабильным значениям плотности полых слитков по сравнению

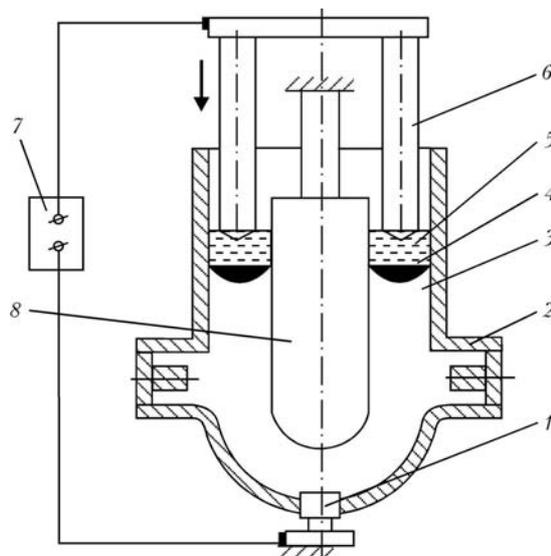


Рис. 3. Схема ЭШЛ полых заготовок корпусов энергетической арматуры с неподвижным многоразовым дорном: 1-7 — здесь и на рис. 4, 5 см. на рис. 1; 8 — неподвижный многоразовый дорн

со сплошными. Так, плотность металла по толщине стенки (220 мм) полого слитка диаметром 540 мм из стали марки 35ХНЗМ остается постоянной и составляет  $7,85 \text{ г/см}^3$ , а в сплошном слитке такого же диаметра она уменьшается к центру на  $0,04 \text{ г/см}^3$ . В результате металл полого слитка характеризуется более высокой пластичностью, чем сплошного [6].

Первый полый электрошлаковый слиток получен в Институте электросварки им. Е. О. Патона еще в 1955 г. [7]. Его выплавляли по схеме, приведенной на рис. 1, только вместо расходуемых электродов большого сечения применяли сварочную проволоку. Для реализации такой схемы выплавки использовали одноразовый внутренний кристаллизатор, который при «раздевании» слитка разрезали и удаляли. В дальнейшем развитии технологии электрошлакового литья (ЭШЛ) полых слитков было направлено на поиск способов извлечения из них внутренних кристаллизаторов без разрушения.

В промышленном производстве освоено три различных способа ЭШЛ полых заготовок, которые отличались особенностями формирования их наружной и внутренней поверхностей. При первом способе полая заготовка выплавляется при неподвижных наружном и внутреннем кристаллизаторах. При втором — наружный кристаллизатор остается неподвижным, а внутренний перемещается относительно выплавляемого слитка. Третий способ отличается тем, что осуществляется относительное перемещение обоих кристаллизаторов и выплавляемого слитка.

Первый способ ЭШЛ преимущественно используется для серийного производства литых электрошлаковых заготовок с полужамкнутыми полостями (рис. 3), которые формируют неподвижным дорном многоразового использования [8]. Такие дорны представляют собой жесткие водоохлаждаемые стержни, изготовленные из металла с тепловым расширением, заметно отличающимся от расширения металла отливки. Каналы для охлаждающей воды

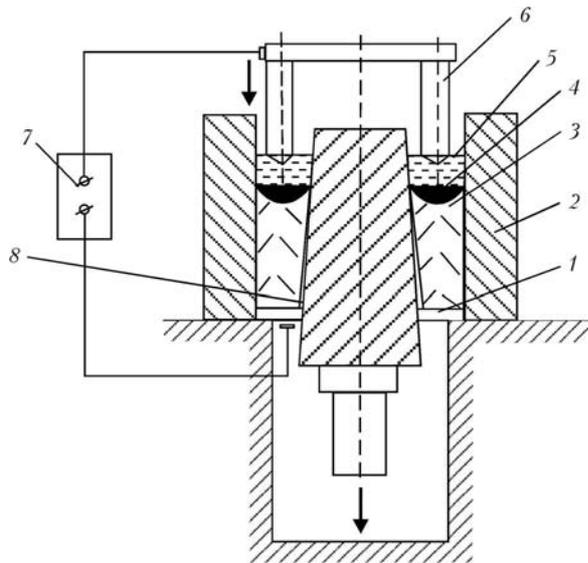


Рис. 4. Схема ЭШЛ полой заготовки с перемещением конического дорна вниз: 8 — подвижный конический дорн

прорезают на поверхности стержня и покрывают их тонкой медной рубашкой.

Для ЭШЛ полой заготовки из углеродистой стали используют дорн со стержнем из аустенитной стали. После плавки заготовку с закатом в ней дорном нагревают в печи. При нагреве она растягивается жестким дорном, имеющим большее тепловое расширение. После охлаждения между ними образуется зазор, и дорн удаляют из заготовки. При выплавке заготовки из аустенитной стали применяют стержень из углеродистой. В этом случае при нагреве в печи литая заготовка расширяется больше, чем дорн, и его извлекают в нагретом состоянии. Поскольку дорны после каждой плавки деформируются незначительно, то могут использоваться многократно [9].

Неподвижный жесткий дорн препятствует свободной усадке металла и вызывает в нем растягивающую деформацию, которая на участках, где металл еще не полностью закристаллизовался, может приводить к образованию горячих трещин. Абсолютное значение растягивающей деформации застывающего металла возрастает с увеличением диаметра полости, что повышает вероятность образования трещины. В связи с этим дорн, выполненный в виде жесткого водоохлаждаемого стержня, может использоваться для формирования внутренних полостей ограниченного диаметра (в некоторых случаях не более 200 мм).

С помощью неподвижных охлаждаемых дорнов получают заготовки с полостями и большего диаметра. В этом случае применяют внутренние кристаллизаторы, способные деформироваться в процессе плавки под действием усаживающегося металла отливки. Это могут быть водоохлаждаемые внутренние кристаллизаторы с одноразовой рубашкой, изготовленной из тонкой углеродистой стали, или разборные дорны. Благодаря взаимному перемещению деталей разборного дорна он в процессе усадки полого слитка не подвергается пластической деформации, что позволяет использовать его многократно [10, 11].

Наибольшее распространение способ ЭШЛ полых заготовок с применением неподвижных дорнов разной конструкции получил при изготовлении деталей энергетического оборудования. Так, из сталей марок 15Х1М1Ф и 0Х18Н10Т изготавливают корпуса задвижек с условным проходом от Ду 100 до 400 массой до 2,2 т для тепловых и атомных электростанций, а из стали марки 0Х18Н10Т — патрубки задвижек с Ду 500 [8, 12]. Из стали 20 производят корпуса клапанов с Ду 800 для второго контура энергоблоков АЭС [13].

Для других отраслей промышленности с помощью таких дорнов изготавливали заготовки контейнерных втулок из стали марки 5ХНМ диаметром 690 мм, имеющие толщину стенки 185 мм и массу 2,5 т [14], полые заготовки крупных гаек из стали 45 массой 175 кг и др. [10].

Для осуществления второго способа ЭШЛ полых заготовок применяют внутренний кристаллизатор в виде усеченного конуса, который в ходе процесса перемещают относительно выплавляемой детали, что позволяет избежать его зажатия остывающим металлом. Конусность дорна назначают такой, чтобы при перемещении последнего уменьшение его диаметра соответствовало тепловой усадке заготовки. При этом дорн располагают большим основанием в сторону его перемещения. В зависимости от направления перемещения в отливках формируется полость различной конфигурации. При перемещении дорна вверх полость имеет постоянный диаметр, а при перемещении вниз формируется полость с небольшой конусностью [15].

В серийном производстве получил применение только способ ЭШЛ с перемещающимся вниз внутренним кристаллизатором. Из-за конусности внутренней полости этот способ выплавки применяют для получения сравнительно коротких заготовок с отношением высоты к внутреннему диаметру, близким к единице. Схема этого процесса представлена на рис. 4. Поскольку электрошлаковую плавку ведут по многоэлектродной схеме в неподвижном кристаллизаторе, выплавляемые слитки имеют гладкую наружную поверхность. Их внутренняя поверхность также получается гладкой (без надрывов) в связи с тем, что конусный дорн, перемещаясь в сторону, противоположную направлению роста заготовки, сжимает корочку затвердевающего металла [15].

Особенность формирования полости при таком способе ЭШЛ позволяет допускать некоторое сдавливание дорна остывающей заготовкой. Значение усилия, необходимого для преодоления зажатия дорна, используют в качестве параметра для регулирования скорости вытягивания [16]. Несомненным достоинством указанного способа ЭШЛ полых заготовок является возможность его осуществления без применения специальных датчиков, определяющих положение уровня металлической ванны относительно подвижного дорна.

Таким способом ЭШЛ серийно изготавливают различные полые заготовки для последующей деформации или использования в литом виде взамен поковок. Для горячей раскатки на кольца и холод-

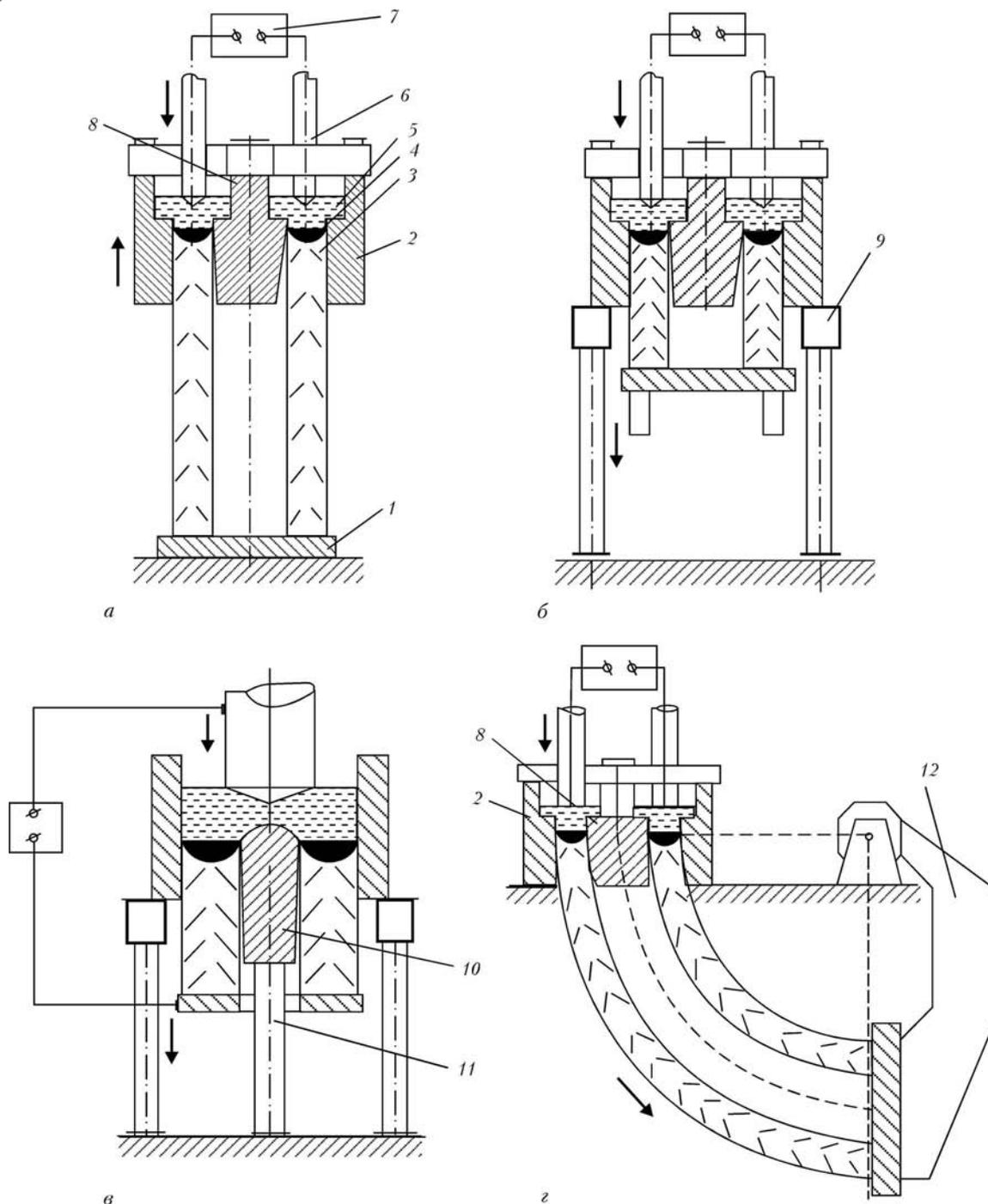


Рис. 5. Схемы ЭШЛ с относительным перемещением кристаллизаторов и полых заготовок: *а* — с неподвижной выплавляемой заготовкой и перемещающимся вверх блоком кристаллизаторов; *б* — с неподвижным блоком кристаллизаторов и перемещающейся вниз выплавляемой заготовкой; *в* — с перемещающейся вниз выплавляемой заготовкой и неподвижными отдельными наружным кристаллизатором и дорном (электрошлаковая прошивка); *г* — с неподвижным блоком кристаллизаторов и перемещающейся по дуге окружности выплавляемой заготовкой; 8 — дорн, соединенный в блок с наружным кристаллизатором; 9 — стационарная платформа для кристаллизатора; 10 — дорн для электрошлаковой прошивки; 11 — шток дорна; 12 — механизм вытягивания заготовки по дуге окружности

ной прокатки на трубы выплавляют полые заготовки диаметром до 440 мм с толщиной стенки до 140 мм и высотой до 500 мм из высоколегированных сталей марок ЭИ811, ЭИ961, ЭП57 и Х16Н6 [17]. Для использования в литом виде из сталей 10Г2, 09Г2С и 16ГС изготавливают патрубки с фланцами диаметром до 550 мм, имеющие толщину стенки 100 мм и высоту до 600 мм [18]. С использованием ЭШЛ также освоено производство из стали 45Г литых ве-

дущих зубчатых колес мощных промышленных тракторов размером 1180×860×140 мм, которые раньше изготавливали из поковок. Способ ЭШЛ позволил резко уменьшить объем механической обработки колес за счет отливки зубьев с минимальными припусками по их профилю [19].

Для получения длинных полых слитков или заготовок используют третий способ ЭШЛ, при котором осуществляют относительное перемещение



выплавленного металла и обоих кристаллизаторов. При этом конусный внутренний кристаллизатор располагают расширением вверх. Применяют разные варианты этого способа: например, выплавляемая полая заготовка остается неподвижной на поддоне, а по мере ее роста перемещают вверх кристаллизаторы (рис. 5, а); неподвижными оставляют кристаллизаторы, а выплавляемую заготовку вместе с поддоном перемещают вниз (рис. 5, б) [20].

Для выплавки заготовок этим способом используемые электроды располагают в виде частокола из круглого или прямоугольного проката. Частокол электродов между кристаллизаторами размещают так, чтобы элементы конструкции, удерживающие дорн в заданном положении, находились в промежутках между отдельными электродами. Кристаллизаторы, объединенные в общий блок, могут иметь в верхней части уширение. В нем во время переплава находится шлаковая ванна и происходит процесс плавления расходуемых электродов [21, 22]. Кристаллизаторы с уширенной плавильной зоной позволяют применять более короткие электроды, поперечное сечение которых может превышать толщину стенки выплавляемой полой заготовки, что дает возможность увеличить длину заготовки не изменяя высоты электрошлаковой установки [23].

При ЭШЛ в уширенном кристаллизаторе расплавленный металл с оплаваемых торцов расходуемых электродов стекает в узкую часть зазора, в котором формируется полая заготовка. Перемещая кристаллизатор или слиток со скоростью плавки, зеркало металлической ванны удерживают на заданном уровне ниже порога уширения. Поверхность шлаковой ванны в уширенной части кристаллизатора также остается практически неподвижной относительно его стенок. В этом случае при прямой схеме подключения источника питания электрод-слиток имеет место локальный износ стенки кристаллизатора в районе зеркала шлаковой ванны. Износ происходит в результате электроэрозии металла под действием той части рабочего тока, которая идет от электрода через шлаковую ванну непосредственно в стенку кристаллизатора [24]. При ЭШЛ слитков с заполнением неподвижного кристаллизатора это явление проявляется слабо, поскольку шлаковая ванна перемещается вдоль всей поверхности стенок кристаллизатора.

С целью борьбы с локальным износом стенок расходуемые электроды попарно соединяют с источником тока по бифилярной схеме. При этом значительно уменьшается доля рабочего тока, которая приходится на кристаллизатор, а соответственно, и локальный износ [25].

При ЭШЛ с относительным перемещением выплавляемого полого слитка и кристаллизаторов скорость перемещения должна соответствовать скорости роста слитка. В случае, если скорость перемещения превысит скорость его роста, произойдет вытекание расплавленного металла через образовавшийся зазор между слитком и конусным дорном. Если же скорость перемещения окажется ниже скорости его роста, произойдет зажатие дорна выплавляемым полым слитком, и при своем дальнейшем движении кристаллизатор начнет отрывать от слитка обжима-

ющую его корочку металла. Поэтому усилие зажатия в данном случае не может использоваться для регулирования скорости взаимного перемещения таким же образом, как при плавке с вытягиванием дорна вниз. Для регулирования скорости взаимного перемещения кристаллизаторов и слитка в этом случае применяют специальные датчики, следящие за уровнем металлической ванны. Разработаны и используются датчики индукционного [26], теплового [27] и потенциального [28] типов, которые устанавливают в стенке кристаллизатора ниже порога уширения.

Способами ЭШЛ с относительным перемещением обоих кристаллизаторов в промышленных условиях изготавливают длинные полые заготовки диаметром до 1500 мм, с толщиной стенки от 40 до 350 мм [23, 29–31]. Наиболее типичные примеры использования таких заготовок из различных классов сталей приведены ниже.

Из углеродистой стали 20 производят полые заготовки диаметром 680 мм, имеющие толщину стенки 110 мм и длину 1,5 м. Из них изготавливают корпуса сервомоторов для гидроэлектростанций [12].

Из легированной конструкционной стали марки 38ХМ получают широкую номенклатуру полых заготовок, которые используются для последующей раскатки на кольца [29].

Из инструментальной стали марки 9ХФ отливают заготовки диаметром 1200 мм, с толщиной стенки 320 мм, имеющие длину до 2,4 м и массу свыше 16 т, для литых бандажей опорных валков прокатных станов [32].

Из штамповых сталей марок 4Х5МФС и 4Х4М2ВФС выплавляют втулки диаметром от 295 до 775 мм и внутренним диаметром от 145 мм до 365 мм для гидроконтейнеров горизонтальных трубных прессов [31]. Опыт эксплуатации литых электрошлаковых втулок показал, что их стойкость в 2 раза превышает стойкость кованных.

Из нержавеющей стали марки 07Х16Н6 выплавляют заготовки барабанов массой 6 т, длиной 2,5 м, диаметром 1460 мм, с толщиной стенки 80 мм [33]. Из стали марки 12Х18Н10Т изготавливают заготовки корпусов сосудов, работающих при температуре жидкого азота и давлении 7 МПа, длиной 2,5 м, диаметром 715 мм, с толщиной стенки 170 мм [34].

Существует разновидность технологии ЭШЛ, при которой слиток вытягивают вниз, а наружный кристаллизатор и дорн не соединяют в общий блок. В этом случае дорн устанавливают на жестком штоке, через который также осуществляется подвод и отвод охлаждающей воды. В процессе ЭШЛ верхний торец внутреннего кристаллизатора удерживают ниже уровня шлака так, чтобы он лишь немного выступал над металлической ванной. При этом пространство внутри кристаллизатора выше зеркала шлаковой ванны остается свободным для размещения расходуемых электродов [35, 36]. Схема такого процесса ЭШЛ приведена на рис. 5, в.

Преимуществом этого варианта ЭШЛ полых слитков является возможность применять для переплава один расходуемый электрод большого сечения. В ходе процесса ЭШЛ происходит как бы прошивка сплошного электрода и формирование по-



лой заготовки. Эта разновидность ЭШЛ получила название электрошлаковая прошивка.

При прошивке отпадает необходимость использовать для переплава тонкий прокат из требуемой марки металла и изготавливать из него расходный электрод в виде частокола прутков. Использование одного электрода упрощает процесс подготовки ЭШЛ и существенно снижает затраты на его проведение. Особенно эффективна прошивка при производстве полых заготовок из труднодеформируемых сталей и сплавов, из которых сложно получать тонкие прутки. При этом для выплавки полых заготовок можно использовать литые расходные электроды, изготовленные способами вакуумной индукционной плавки и вакуумного дугового переплава.

Промышленное освоение способа прошивки наталкивается на некоторые трудности, связанные со стойкостью технологической оснастки. Во-первых, максимальная длина полых заготовок, выплавляемой таким способом, ограничена жесткостью штока, сохраняющего с требуемой точностью расположение дорна относительно наружного кристаллизатора. Во-вторых, из-за прямой схемы подключения расходного электрода к источнику питания происходит не только локальный электроэрозионный износ стенки наружного кристаллизатора, но также интенсивное разрушение верхней части дорна. Износ дорна проходящим током усугубляется дождем капель перегретого металла, попадающим на него с оплаваемого торца расходного электрода.

Для уменьшения этих вредных явлений применяют составные кристаллизаторы и дорны, собранные из отдельных изолированных друг от друга частей. Кроме того, с помощью продувки шлаковой ванны инертными газами через дорн зону каплепадения смещают с верхнего торца дорна на зеркало кольцевой металлической ванны. Эти технологические приемы увеличивают срок службы кристаллизаторов до нескольких сотен плавов [37].

Электрошлаковой прошивкой выплавляли полые заготовки диаметром 525 мм, с толщиной стенки 135 мм, длиной до 1,5 м из стали марки 30ХН2М и никелевого сплава, имеющего следующий состав, мас. %: 20 Cr; 20 Fe; 5 Nb; 3 Mo и 1 Ti. Эти заготовки предназначены для последующей деформации [36]. Серийно изготавливали также из стали 20Х электрошлаковые литые заготовки продольных суппортов станков-автоматов. Выплавляли заготовки длиной 1,4 м с фасонной наружной поверхностью и полостью диаметром 135 мм [35, 37].

Способом ЭШЛ с вытягиванием получали также полые заготовки с криволинейной осью. При этом формирующим частям кристаллизаторов придавали нужную кривизну, а заготовку вытягивали по дуге окружности необходимого радиуса. Схема процесса приведена на рис. 5, г. Этим способом ЭШЛ изготавливают трубные колена из жаростойкой хромоникелевой стали типа 25–20 [38], отводы Ду 350 с толщиной стенки 60 мм, имеющие массу до 950 кг, из сталей марок 14ХГС и 30ХМА. Их используют для изготовления трубопроводов и теплообменников, работающих при высокой температуре и давлении. По-

лученные этим способом литые электрошлаковые колена могут иметь угол поворота до 180° [13].

Применяя схему с вытягиванием заготовки по окружности только из наружного кристаллизатора отливают полукольца сплошного сечения; сваривая их попарно получают литые электрошлаковые кольцевые заготовки. С помощью такой технологии изготавливают бандаж цементных печей Т-образного профиля из стали 35. Эти кольца ввариваются в корпус печи и служат опорами при ее вращении. Они имеют ширину опорной части 900 мм, а общую — 1500 мм. Диаметр опорной части колец составляет 6 м, внутренний диаметр — 5 м, масса — 65 т. Применение таких электрошлаковых бандажей позволило увеличить жесткость корпуса цементной печи и значительно повысить стойкость ее футеровки [39].

Для использования в литом виде без последующей деформации можно получать не только цилиндрические заготовки с полостью, расположенной концентрично, но и заготовки с любой другой постоянной по длине формой поперечного сечения. Например, получены заготовки длиной 4 м с эксцентрично расположенной полостью и прямоугольным выступом снаружи со стороны наибольшей толщины стенки [40], а также цилиндрические заготовки корпуса двухчервячного гранулятора длиной 1,7 м с полостью в форме восьмерки, состоящей из двух окружностей диаметром 80 мм [41]. Выплавляли также заготовки в форме параллелепипеда размером 600×540×830 мм с прямоугольным отверстием 190×160 мм [42].

Для некоторых машиностроительных деталей, работающих в условиях нагрева, требуются длинные заготовки со сквозными отверстиями для охлаждения. Получение длинных отверстий путем механической обработки весьма сложно. Способ ЭШЛ с относительным перемещением кристаллизаторов значительно упрощает изготовление таких деталей. Для получения длинных заготовок с несколькими изолированными друг от друга продольными отверстиями внутри наружного кристаллизатора размещают соответствующее количество охлаждаемых конических дорнов. Примером такой литой заготовки является охлаждаемая направляющая длиной 3,7 м в виде фасонного профиля с четырьмя продольными сквозными отверстиями диаметром 23 мм из стали марки 3Х13 [43].

На рис. 6 показаны формы поперечного сечения некоторых литых фасонных заготовок, полученных рассмотренными выше способами ЭШЛ.

Для промышленного производства электрошлаковых полых слитков и заготовок разной массы была создана серия электрошлаковых печей [44]. Для конкретных изделий разработана водоохлаждаемая специализированная медная или стальная технологическая оснастка (кристаллизаторы, дорны, поддоны), с помощью которой можно выплавлять заготовки различных форм и размеров [10, 45, 46]. Разработаны методики расчета и проектирования разных типов кристаллизаторов с конвективным или кипящим режимами охлаждения [4].

Анализ возможностей различных способов получения полых литых электрошлаковых заготовок

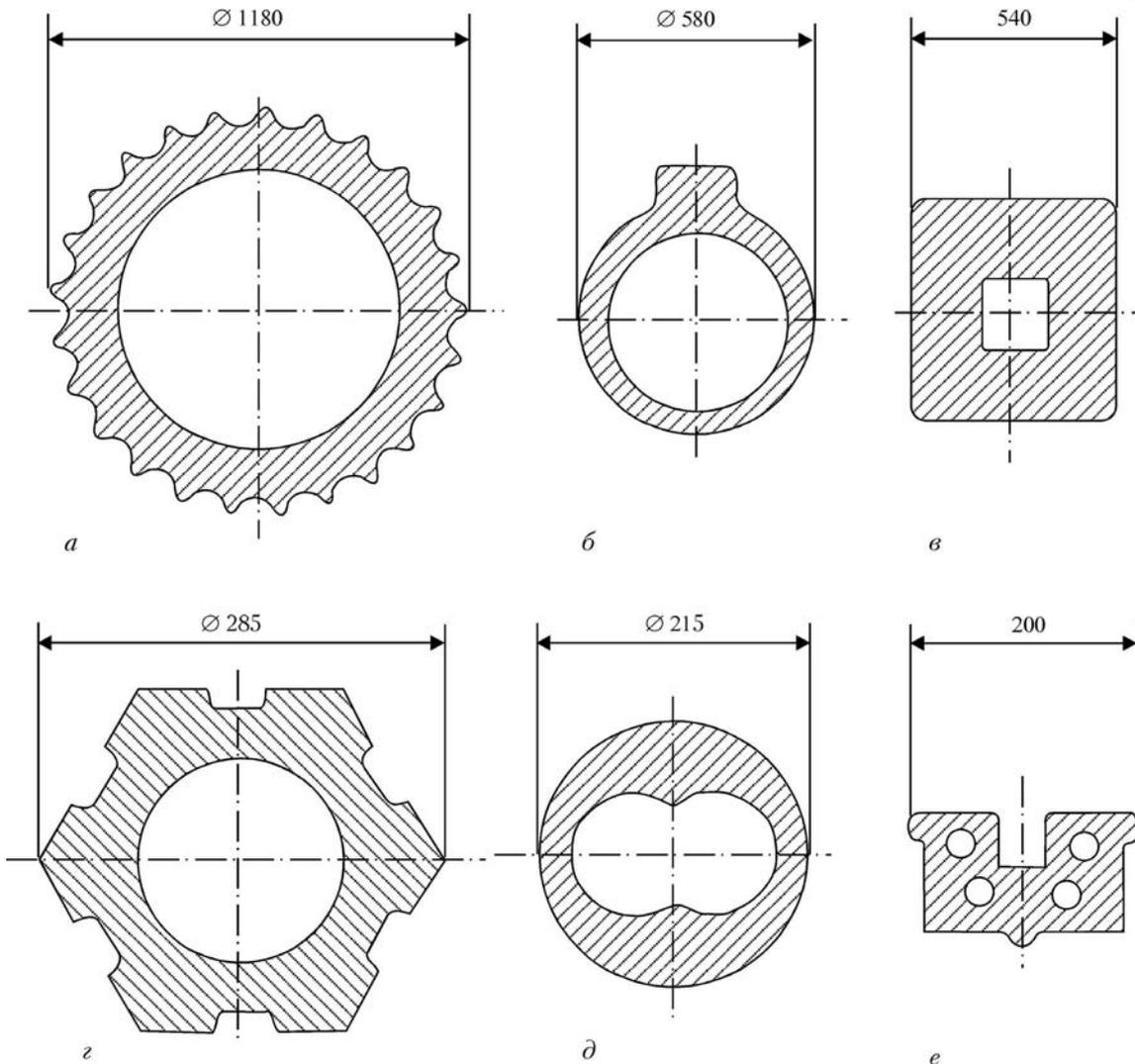


Рис. 6. Формы поперечного сечения некоторых ЭШЛ заготовок, используемых в литом виде: а — ведущего колеса тяжелого трактора; б — деталей с переменной толщиной стенки; в — детали с прямоугольным отверстием; г — продольного суппорта станка-автомата; д — корпуса двухчервячного гранулятора; е — направляющей с каналами для охлаждения

и опыт их использования в промышленности позволили дать следующие рекомендации:

Выплавку заготовок с полужамкнутыми полостями наиболее рационально производить способом ЭШЛ с использованием неподвижных наружного и внутреннего кристаллизаторов.

Выплавку полых заготовок ограниченной высоты можно осуществлять способом ЭШЛ с использованием неподвижного наружного кристаллизатора и подвижного относительно отливаемой заготовки внутреннего. При этом наружная поверхность получаемых заготовок может иметь сложную форму.

Для выплавки длинных заготовок постоянного поперечного сечения с одной или несколькими полостями следует использовать технологию ЭШЛ с относительным перемещением выплавляемой заготовки и кристаллизаторов.

### Выводы

1. Специалистами разных стран создана и внедрена в промышленное производство особая разновидность электрошлакового процесса — ЭШЛ полых

слитков и заготовок. Эта технология позволяет получать непосредственно в процессе ЭШЛ полые литые заготовки, металл которых имеет более высокие служебные свойства, чем деформированный.

2. Электрошлаковые литые полые заготовки значительно упрощают изготовление из них многих уникальных деталей. Технология ЭШЛ решает также задачу получения полых заготовок сложного профиля из труднодеформируемых высоколегированных сталей и сплавов, которые находят все более широкое применение в промышленности.

1. *Электрошлаковый металл* / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1981. — 680 с.
2. *Медовар Б. И., Цыкуленко А. К., Дяченко Д. М.* Качество электрошлакового металла. — Киев: Наук. думка, 1990. — 312 с.
3. *Исследование теплообмена при электрошлаковом переплаве по различным схемам* / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. Л. Шевцов и др. // *Электрошлаковый переплав*. — Вып. 4. — Киев: Наук. думка, 1977. — С. 237–244.
4. *Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве* / Под ред. Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1978. — 303 с.
5. *Митчелл А., Бэлентайн А. С.* Факторы, влияющие на кристаллизацию и температуру слитков при ЭШП //



- Электрошлаковый переплав. — Вып. 6. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 192–198.
6. Особенности структуры и свойств полых слитков электрошлаковой выплавки / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, Л. В. Чекотило и др. // Специальная электрометаллургия. — Ч. 1. — Киев: Наук. думка, 1972. — С. 130–140.
  7. Медовар Б. И. Электрическая отливка слитков // Электрошлаковая сварка / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев-М.: Машгиз, 1956. — С. 155–158.
  8. Разработка и внедрение технологии электрошлаковой выплавки корпусов энергетической арматуры / В. И. Рабинович, Л. Д. Замошников, Ю. Н. Кригер и др. // Специальная электрометаллургия. — Ч. 1. — Киев: Наук. думка, 1972. — С. 173–177.
  9. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Бойко Г. А. Электрошлаковое литье (Обзор). — М.: НИИмаш, 1974. — 70 с.
  10. Южанин Ж. И. Освоение производства электрошлаковых отливок на Коломенском заводе тяжелого станкостроения // Проблемы электрошлаковой технологии. — Киев: Наук. думка, 1978. — С. 150–154.
  11. А. с. 361702 СССР, МПК С 21 С 5/56. Дорн / А. П. Белоглазов, Б. И. Медовар, И. И. Кумыш и др. — Оpubл. 05.06.80; Бюл. № 21.
  12. Кригер Ю. Н., Нечаев Е. А., Карнов О. С. Электрошлаковая выплавка в энергетическом машиностроении // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1985. — № 3. — С. 24–28.
  13. Аликин А. П., Бойко Г. А. Электрошлаковое литье в химическом машиностроении // Электрошлаковая технология. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 123–128.
  14. Южанин Ж. И., Цытунова И. Р., Агафонов А. С. Изготовление заготовок контейнерных втулок из стали 5ХНМ с помощью электрошлакового литья // Металловедение и термич. обработка мет. — 1979. — № 6. — С. 53–55.
  15. Медовар Б. И., Чекотило Л. В., Павлов В. Л. Электрошлаковая выплавка полых слитков // Вопросы специальной электрометаллургии: Материалы Междунар. симп., г. Киев, июнь 1972 г. — Киев-М., 1973. — С. 42–46.
  16. Южанин Ж. И. Вспомогательное технологическое оборудование в производстве электрошлаковых отливок. — Пробл. спец. электрометаллургии. — 1983. — № 19. — С. 29–32.
  17. Электрошлаковый переплав на Кулебакском металлургическом заводе им С. М. Кирова / А. Я. Рабинович, Б. Р. Желнин, А. В. Маринин А.В. и др. // Электрошлаковая технология. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 43–49.
  18. Заводской опыт электрошлаковой отливки полых слитков фасонных заготовок по способу «конус» / Л. В. Чекотило, В. Л. Павлов, А. П. Аликин и др. // Электрошлаковая технология. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 137–144.
  19. Кумыш И. И., Десатов В. Т., Петров Ю. Б. Электрошлаковая отливка заготовок ведущих колес промышленных тракторов // Проблемы электрошлаковой технологии. — Киев: Наук. думка, 1978. — С. 154–158.
  20. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Латаш Ю. В. Электрошлаковая отливка и перспективы ее применения в литейном производстве // Механические свойства литого металла. — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — С. 141–146.
  21. Пат. 1326579 Англии. Устройство для электрошлакового переплава металлов / Б. И. Медовар, В. М. Баглай, Б. Б. Федоровский и др. — Оpubл. 15.08.73; Пат. 920596 Италии. — Оpubл. 15.03.72; Пат. 36669 Канады. — Оpubл. 13.11.73; Пат. 2054529 ФРГ. — Оpubл. 10.05.72; Пат. 342258 Швеции. — Оpubл. 21.01.72.
  22. Развитие новой технологии для шлакового литья применительно к производству цилиндрических изделий // Электрошлаковый переплав. — Вып. 3: Материалы IV Междунар. симп. по процессам электрошлакового переплава, г. Токио, Япония, 1973 г. — Киев: Наук. думка, 1975. — С. 178–193.
  23. Медовар Б. И., Баглай В. М., Чекотило Л. В. Электрошлаковая отливка крупногабаритных труб высокого давления // Электрошлаковый переплав. — Вып. 5. — Киев: Наук. думка, 1979. — С. 215–218.
  24. Анодное разрушение кристаллизатора при ЭШП / Б. И. Медовар, В. Л. Артамонов, В. М. Баглай, В. П. Сокол // Рафинирующие переплавы. — Киев: Наук. думка, 1974. — С. 35–40.
  25. Электрошлаковая отливка труб / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. М. Баглай и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1977. — Вып. 7. — С. 3–9.
  26. Индуктивные датчики уровня металла для электрошлаковых печей / О. П. Бондаренко, А. М. Марченко, А. И. Кравчук и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1976. — Вып. 5. — С. 6–10.
  27. Температурный уровень для установок рафинирующих переплавок / О. А. Герашенко, В. Л. Шевцов, А. М. Пальти, Г. С. Маринский // Проблемы электрошлаковой технологии. — Киев: Наук. думка, 1978. — С. 100–104.
  28. Некоторые вопросы исследования потенциального поля шлаковой ванны в подвижных кристаллизаторах при электрошлаковом переплаве / Г. А. Тимашов, И. А. Генис, Б. Б. Федоровский и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1981. — Вып. 14. — С. 25–27.
  29. Полые слитки ЭШП — заготовки для горячей раскатки на кольца и обечайки / Б. П. Васильев, Б. Б. Федоровский, В. И. Ус и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1991. — № 4. — С. 6–9.
  30. Баглай В. М., Федоровский Б. Б., Тимашов Г. А. Получение тонкостенных труб методом электрошлакового литья. — Пробл. спец. электрометаллургии. — 1976. — Вып. 5. — С. 34–40.
  31. Жадкевич М. Л., Федоровский Б. Б., Бородин А. И. Высококачественные литые полые электрошлаковые заготовки // Литейное пр-во. — 1988. — № 8. — С. 12–13.
  32. Применение полых электрошлаковых заготовок в тяжелом машиностроении / Б. Б. Федоровский, Г. А. Тимашов, Ю. Г. Емельяненко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1987. — № 2. — С. 24–27.
  33. Южанин Ж. И., Дубинский Р. С. ЭШЛ в ПО «Коломенский завод тяжелых станков» // Электрошлаковая технология. — Киев: Наук. думка, 1988. — С. 94–97.
  34. Электрошлаковая выплавка заготовок сосудов высокого давления из аустенитной стали / Б. И. Медовар, А. Д. Чепурной, В. Я. Саенко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1981. — Вып. 15. — С. 13–16.
  35. Получение фасонных заготовок деталей станков способом электрошлаковой прошивки / Г. А. Тимашов, Б. Б. Федоровский, Б. А. Хлебников и др. // Электрошлаковая технология. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 99–101.
  36. Клейн Г. Дж., Венал У. В., Лав К. Л. Электрошлаковая выплавка полых слитков // Электрошлаковый переплав. — Вып. 5. — Киев: Наук. думка, 1979. — С. 155–169.
  37. Опыт внедрения технологии электрошлаковой прошивки при получении фасонных полых заготовок / Г. А. Тимашов, Б. Б. Федоровский, В. А. Крепак и др. // Спец. электрометаллургия. — 1984. — Вып. 54. — С. 44–46.
  38. Уджи А. Изготовление фасонных колец с помощью процесса ЭШЛ с вытягиванием и вращением // Электрошлаковый переплав. — Вып. 4. — Киев: Наук. думка, 1977. — С. 165–175.
  39. Внедрение электрошлаковой технологии изготовления заготовок сварных бандажей на заводе «Волгоцеммаш» / В. К. Похлебаев, З. И. Дмитриев, А. П. Белоглазов и др. // Электрошлаковая технология. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 93–96.
  40. Применение ЭШЛ для получения длинных фасонных отливок с фланцами / Б. Б. Федоровский, Г. А. Тимашов, И. Д. Нагаевский и др. // Электрошлаковая технология. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 78–80.
  41. Электрошлаковая отливка заготовок корпусов двухчервячных грануляторов / Б. И. Медовар, Г. А. Тимашов, Б. Б. Федоровский и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1979. — Вып. 11. — С. 41–43.
  42. Электрошлаковая выплавка полых слитков прямоугольного сечения / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, Л. В. Чекотило и др. // Спец. электрометаллургия. — 1971. — Вып. 13. — С. 35–39.
  43. ЭШЛ длинных заготовок с получением одновременно нескольких отверстий малого диаметра / Б. Б. Федоровский, Г. А. Тимашов, Л. И. Бондаренко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1986. — № 3. — С. 38–39.
  44. Электрошлаковые печи / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1976. — 414 с.
  45. Бондаренко Л. И., Тимашов Г. А., Федоровский Б. Б. Секционные кристаллизаторы для ЭШЛ крупногабаритных полых заготовок // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1986. — № 1. — С. 26–30.
  46. К. А. Цыкуленко. Развитие электрошлаковых технологий и совершенствование конструкций кристаллизаторов ЭШП (Обзор) // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 4. — С. 8–18.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 17.03.2008



УДК 669.187.56

# ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА КОНУСНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ СТАЛИ 20Х13, ПОЛУЧЕННЫХ СПОСОБОМ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ЛИТЬЯ

С. В. Скрипник, Д. Ф. Чернега, А. В. Горячек

Приведены сведения о химическом составе, структуре, механических свойствах электрошлаковой стали 20Х13 в сравнении с ковальной сталью аналогичного состава. Обоснована возможность применения заготовок ЦЭШЛ из этой стали в производстве корпусных деталей газовых турбин.

Information is given about chemical composition, structure, mechanical properties of electroslag steel 20Kh13 as compared with a forged steel of similar composition. The feasibility of application of CESC billets of this steel in the production of casing parts of gas turbines is grounded.

**Ключевые слова:** детали газовых турбин; жаропрочные стали; центробежное электрошлаковое литье; пластичность; ударная вязкость

По новой технологии способом центробежного электрошлакового литья (ЦЭШЛ) [1, 2] получена партия заготовок диаметрами 716 и 490 мм, высотой 500 мм, массой 0,6 т из стали 20Х13. В настоящей работе исследовали качество металла заготовок деталей газовых турбин, изготовленных этим способом из жаропрочной стали мартенситного класса типа 20Х13.

Заготовки, представляющие собой толстостенный усеченный конус (рис. 1), получали на установке КЦЭШЛ-1 с вертикальной осью вращения [3].

Исследование химического состава заготовок ЦЭШЛ из стали 20Х13 выполнено количественным спектральным анализом. Массовая доля элементов в отливке ЦЭШЛ соответствует содержанию их в исходном металле, за исключением кремния и серы, и соответствует требованиям ГОСТ 5632-72 для этой стали (табл. 1). Макроструктура заготовок — плотная, без дефектов усадочного происхождения. Она состоит из двух основных зон, отличающихся друг от друга дисперсностью кристаллической структуры, — наружной протяженностью 5... 8 мм с мелкокристаллической структурой и основной с более крупной структурой, представленной столб-

чатыми кристаллами. Ультразвуковой контроль дефектов литейного характера не обнаружил.

Для изучения свойств по высоте отливки вырезали несколько колец (№2, 3, 4) высотой и толщиной стенки 85×85 мм, для проведения макро- и микроисследований — еще одно кольцо (№1). Из полученных колец изготовили образцы. Продольные, тангенциальные и разрывные образцы подвергли

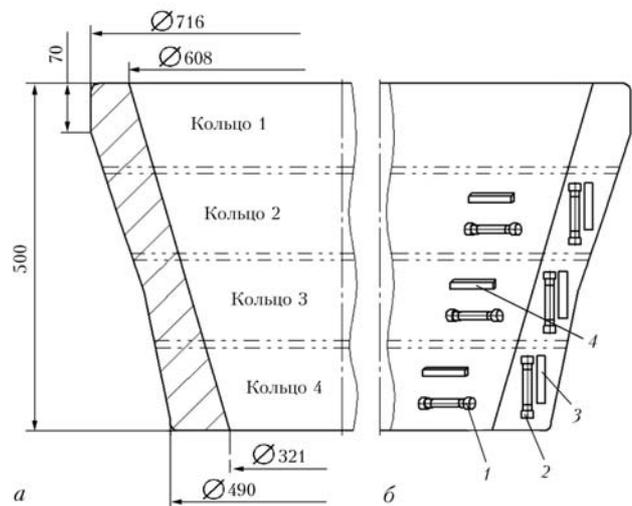


Рис. 1. Заготовка ЦЭШЛ (а) и схема вырезки образцов (б): 1 — тангенциальные разрывные; 2 — продольные разрывные; 3 — продольные ударные; 4 — тангенциальные ударные

Таблица 1. Химический состав стали 20Х13

Объект исследования	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	Fe	Ni	S	P
Исходный металл (литые электроды)	0,16	0,25	0,35	12,0	Основа	0,5	0,012	0,021
Заготовка ЦЭШЛ	0,16	0,22	0,35	12,0	»	0,5	0,008	0,021
Требования ГОСТ 5632-72	0,16...0,25	Не более 0,8	Не более 0,8	12,0... 14,0	»	—	Не более 0,025	Не более 0,030



Таблица 2. Механические свойства стали 20Х13 в отливке после термической обработки

№ кольца	Место вырезки образца в отливке	Направление вырезки образца	$T_{исп}$ , °C	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$KCU$ , Дж/см <sup>2</sup>	$d_{отп}$ , НВ	
2	Верхняя часть	Тангенциальное	20	890	710	17,0	55	68	63	3,8/255
				890	720	16,0	51	65	75	
				880	690	17,5	49	55	63	
				880	730	15,5	54	65	73	
		Продольное	20	900	710	16,5	56	70	58	3,8/255
				890	720	16,5	56	63	75	
				880	690	16,5	51	68	45	
				890	730	15,0	43	63	56	
3	Средняя часть	Тангенциальное	20	870	710	14,5	51	55	53	3,8/255
				870	680	18,5	53	63	60	
				860	710	17,0	57	58	50	
				870	720	16,5	56	75	73	
		Продольное	20	860	670	15,0	57	63	63	3,8/255
				860	710	14,0	48	53	53	
				870	710	14,5	51	50	40	
				870	720	16,5	51	60	65	
4	Нижняя часть	Тангенциальное	20	870	710	14,15	51	55	53	3,8/255
				880	730	15,5	54	65	73	
				870	720	16,17	56	75	73	
				880	690	17,5	51	55	63	
		Продольное	20	870	710	14,5	51	53	51	3,8/255
				890	720	16,5	56	63	75	
				860	710	15,0	57	63	63	
				880	730	15,5	54	65	73	
			20	>70	>55	>12	>40	>40	4,1...3,7	

\* Здесь  $d_{отп}$  — диаметр отпечатка в миллиметрах.

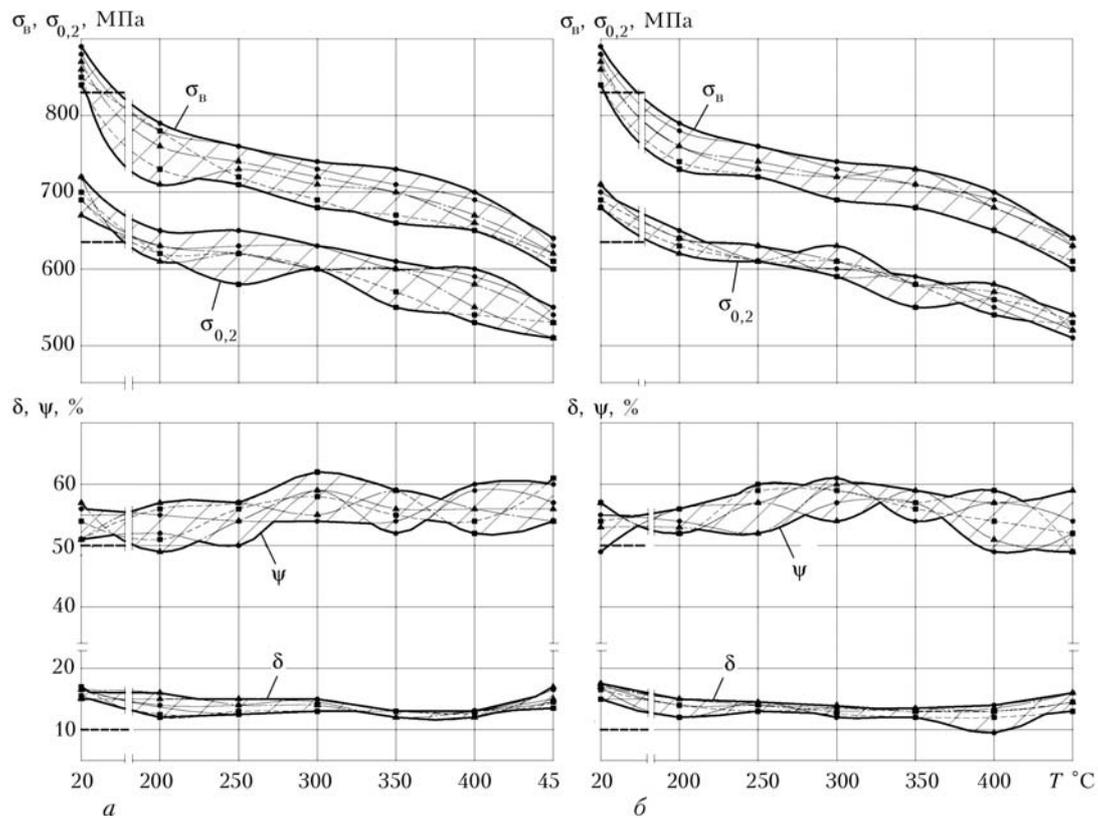


Рис. 2. Графики механических свойств литой термически обработанной на твердость  $HB$  269... 255 ( $d_{отп} = 3,7 \dots 3,8$  мм) стали 20Х13:  $a$  — продольные;  $b$  — тангенциальные образцы; ● — кольцо № 2; ▲ — кольцо № 3; ■ — кольцо № 4; жирными штриховыми линиями обозначены значения механических свойств по ГОСТ 5632 – 72



Рис. 3. Микроструктура (X100) кольца

термообработке по следующему предварительному режиму: нормализация при  $T_1 = 950\text{ }^\circ\text{C}$ , охлаждение на воздухе; двойной отпуск при  $T_2 = 680\text{ }^\circ\text{C}$ , охлаждение на воздухе (дважды). Окончательную термическую обработку проводили по режиму: нормализация при  $T_3 = 950\text{ }^\circ\text{C}$ , охлаждение на воздухе; отпуск при  $T_4 = 710\text{ }^\circ\text{C}$ , охлаждение на воздухе. После термической обработки измеряли твердость колец шариком диаметром  $D=10\text{ мм}$  под нагрузкой  $P = 27,3\text{ кН}$  с выдержкой  $t = 10\text{ с}$ .

Исследования на ударную вязкость, разрыв ( $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ), растяжение при повышенных температурах и длительную прочность проводились на тангенциальных и продольных образцах, вырезанных с противоположных сторон колец. Испытания на ударную вязкость проведены на 10 образцах каждого направления, на разрыв и растяжение — на 4 образцах каждого направления. Полученные результаты испытаний на разрыв, ударную вязкость колец соответствуют требованиям, предъявляемым к деформированному металлу открытой выплавки (табл. 2). Временная прочность  $\sigma_v$  оказалась выше требований стандарта на поковки на 30 %, а предел текучести  $\sigma_{0,2}$  — на 55 %.

На рис. 2 представлены результаты испытаний механических свойств в интервале температур 20... 450 °C на 6 образцах каждого направления. Из рисунка видно преимущество стали 20X13 в отливках ЦЭШЛ по пластичности ( $\delta, \psi$ ), в сравнении с кованным металлом. Так, по относительному удлинению  $\delta$  превышение составляет 50 %, а по относительному сужению  $\psi$  — 5... 8 %. Следует ожидать, что при более высокой температуре отпуска пластичность ( $\delta, \psi$ ) в большей степени превысит требования стандарта на поковки.

При испытании на длительную прочность по режимам  $T_1 = 250\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\sigma = 530\text{ МПа}$ ;  $T_2 = 300\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\sigma = 495\text{ МПа}$ ;  $T_3 = 350\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\sigma = 460\text{ МПа}$ ;  $T_4 = 400\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\sigma = 410\text{ МПа}$  все образцы отстояли по 200 ч без разрушения, что более чем в два раза превышает требования технических условий Украины.

Ударная вязкость электрошлаковой стали 20X13, термически обработанной на твердость

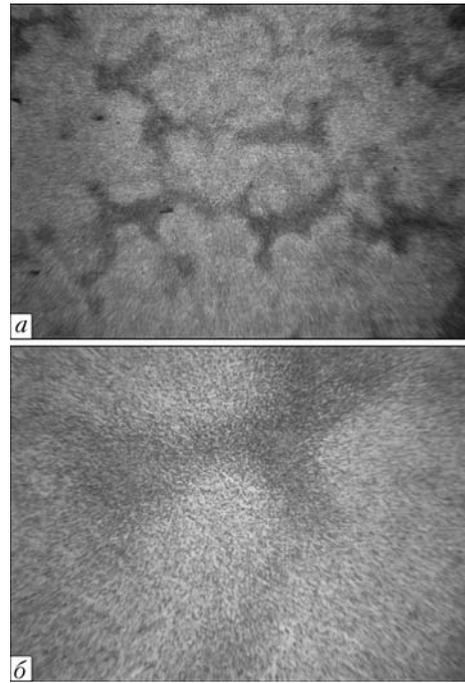


Рис. 4. Микроструктура кольца после термической обработки на твердость  $HB\ 269...255$ : а — X100; б — X400

$HB\ 269...255$  ( $d_{отп} = 3,7...3,8\text{ мм}$ ), также превысила требования стандарта на 50 %.

Микроисследование показало (рис. 3) наличие в структуре стали небольшого количества мелких глобулярных неметаллических включений, которые равномерно распределены в теле отливки.

Микроструктура стали после термической обработки на твердость ( $HB\ 269...255$ ) представляет собой сорбит отпуска (рис. 4), обуславливающий высокие значения вязкостных и пластических свойств стали.

Таким образом, проведенные исследования качества центробежных электрошлаковых заготовок из стали 20X13 свидетельствуют о полном соответствии (а по ряду показателей — и о превышении) свойств литого металла требованиям технических условий Украины на поковки из этой стали открытой выплавки. Электрошлаковые отливки из стали 20X13 можно рекомендовать для использования в качестве заготовок в деталях газовых турбин взамен поковок. Работы по совершенствованию технологии продолжаются.

1. Медовар Б. И., Миринский Г. С., Шевцов В. Л. Центробежное электрошлаковое литье. — Киев: О-во «Знание» УССР, 1983. — 48 с.
2. Электрошлаковая тигельная плавка и разливка металла / Б. И. Медовар, В. Л. Шевцов, В. М. Мартын и др.; Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1988. — 216 с.
3. Комплекс КЦЭШЛ-1 для получения электрошлаковых кольцевых заготовок весом до 1000 кг / Ю. Н. Бондин, А. В. Горячек, С. В. Скрипник и др. // Металлургия машиностроения. — 2006. — № 3. — С. 35–37.

НПФ «Титан»

НТУУ «КПИ», г. Киев

ГП НПКи «Зоря»-«Машпроект», г. Николаев

Поступила 18.07.2008



УДК 669.187.56.530.17

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ШЛАКОВОЙ ВАННЫ В СЛЯБОВОМ ТОКОПОДВОДЯЩЕМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ. Часть 2. Наплавка

К. А. Цыкуленко, О. М. Вислобоков

Исследована гидродинамика шлаковой ванны в слябовом токоподводящем кристаллизаторе для процесса наплавки. Показано, что характер гидродинамических потоков в шлаковой ванне зависит от соотношения параметров наплавляемого слоя, расстояния между токоподводящей секцией и уровнем металлической ванны в кристаллизаторе. Изучено распределение тока как вдоль цепи электродов токоподводящей секции кристаллизатора, так и по всему объему шлаковой ванны.

Hydrodynamics of slag pool in a slab current-carrying mould for the process of cladding has been investigated. It is shown that the mode of hydrodynamic flows in a slag pool depends on ratio of parameters of the clad layer, distance between the current-carrying section and level of metal pool in the mould. The current distribution both along the circuit of electrodes of the current-carrying section of the mould and also across the whole volume of slag pool was studied.

**Ключевые слова:** слябовый токоподводящий кристаллизатор; схемы подключения; гидродинамические потоки в процессе наплавки; растекание тока

В продолжение работ по моделированию гидродинамики шлаковой ванны в слябовом токоподводящем кристаллизаторе, описанных в статье [1], исследованы гидродинамические потоки при наплавке. Для этого в используемой ранее модели на поддоне размещали стальные заготовки, сечение которых подбирали таким образом, чтобы между ними и всеми электродами токоподводящей секции оставался одинаковый зазор, соответствующий толщине наплавляемого слоя (7,5 или 17,5 мм). Стальные заготовки надежно фиксировали на поддоне на двух медных стержнях, обеспечивающих токоподвод. Для предотвращения возможного перекоса заготовки и обеспечения равномерности заданного зазора по периметру модели между электродами и стальными заготовками устанавливали деревянные распорки, размещая их только по самому верхнему краю токоподводящей секции, а уровень моделирующего шлаковую ванну насыщенного раствора хлористого кальция всегда располагался ниже (рис. 1).

При наплавке, как и при выплавке слитка в токоподводящем кристаллизаторе, наличие разрыва в токоподводящей секции приводит к формированию горизонтального потока, направленного от места подключения кабеля вдоль цепи электродов по периметру секции к разрыву. Однако в этом случае интенсивность вращения потока в зазоре между на-

плавляемой заготовкой и стенкой кристаллизатора, при всех прочих равных условиях, заметно ниже (в нашем случае примерно в два раза). Уменьшение зазора также приводит к снижению интенсивности вращения такого потока. Повысить ее можно только за счет увеличения тока в цепи электроды–поддон. Расположение поддона (расстояние до токоподводящей секции  $h$ ) никак не отражается на интенсивности вращения и практически не изменяет ток в цепи электродов токоподводящей секции. Ось горизонтального потока размещена не по центру зазора, а ближе к поверхности токоподводящей секции (рис. 2).

Снижение интенсивности вращения, по-видимому, связано с концентрацией силовых линий магнитного поля в стальном сердечнике — наплавляемой заготовке. Чем меньше зазор (наплавляемого слоя), тем меньше силовых линий проходит через раствор, а следовательно, меньше напряженность магнитного поля  $H$  в зазоре (рис. 3). В результате сила, действующая на электрически заряженные частицы раствора, моделирующего шлаковую ванну, уменьшается, а интенсивность его вращения снижается.

Вертикальные потоки, зафиксированные при моделировании процесса выплавки слитка [1], в ходе наплавки существенно зависят от положения поддона. В условиях эксперимента при расстоянии от поддона до токоподводящей секции более 50 мм вертикальных потоков для любых схем подключения токоподводящей секции не обнаружено. Они появ-

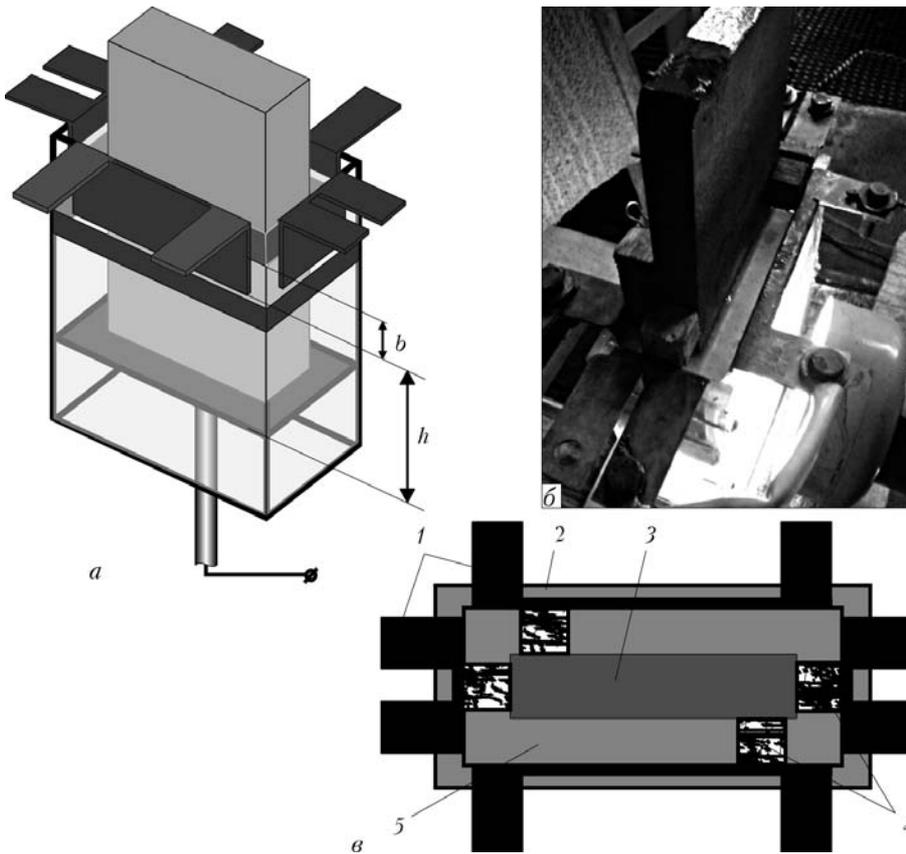


Рис. 1. Общий вид модели токоподводящего slabового кристаллизатора (а, б) и расположение распорок (в) для центрирования заготовки под наплавку: 1 — контакты электродов токоподводящей секции; 2 — корпус кристаллизатора; 3 — наплавляемая заготовка; 4 — деревянные распорки; 5 — моделирующая шлак жидкость в зазоре; *b* — глубина погружения электродов

ляются в случае приближения поддона к медной разделительной секции и наиболее заметны, когда расстояние до токоподводящей секции становится меньше, чем зазор между заготовкой и кристаллизатором. Так, для случая, когда зазор составлял 17,5 мм, а расстояние до токоподводящей секции рав-



Рис. 2. Вращение горизонтального потока при наплавке в токоподводящем кристаллизаторе (вид сверху): 1 — стенки корпуса кристаллизатора; 2 — электроды токоподводящей секции; 3 — поток моделирующего шлак раствора; 4 — зазор (17,5 мм); 5 — наплавляемая заготовка; 6 — деревянная распорка

нялось 12 мм, зафиксированы вертикальные потоки (рис. 4), которые формируются около электродов, направляются вниз вдоль стенок кристаллизатора к поддону, смещаются в соответствии со схемой подключения горизонтальным потоком и восходят к поверхности у граней наплавляемой заготовки (рис. 4, штриховые линии). При наличии одного разрыва в цепи электродов вертикальные потоки со стороны подключения кабеля имеют несколько большую протяженность. При двух разрывах в цепи электродов токоподводящей секции картина потоков симметрична (рис. 4, б).

Необходимо отметить, что формирование нисходящих потоков у электродов токоподводящей секции при наплавке происходит не на участке перехода от токоподводящей к средней (разделительной) секции у нижней границы электродов, как при моделировании процесса выплавки слитка, а на некотором расстоянии от поверхности раствора. Такое явление,

возможно, связано с изменением электрического сопротивления участка цепи токоподводящий электрод-поддон и сил свободной конвекции раствора.

При моделировании процесса выплавки слитка установлено, что зоной наибольшего тепловыделения является нижняя граница электродов токоподводящей секции. В ходе наплавки, когда сопротивление на участке цепи токоподводящий электрод-

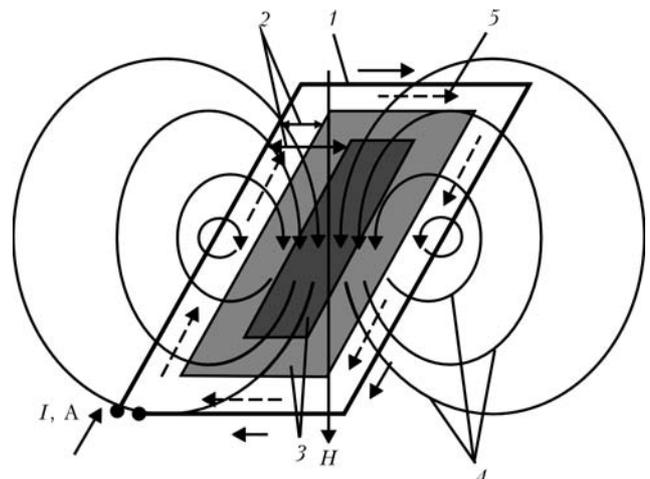


Рис. 3. Вращение моделирующего шлак раствора и концентрация части силовых линий магнитного поля в наплавляемых заготовках: 1 — токоподводящий контур; 2 — зазоры; 3 — наплавляемые заготовки; 4 — силовые линии магнитного поля; 5 — направление вращения раствора

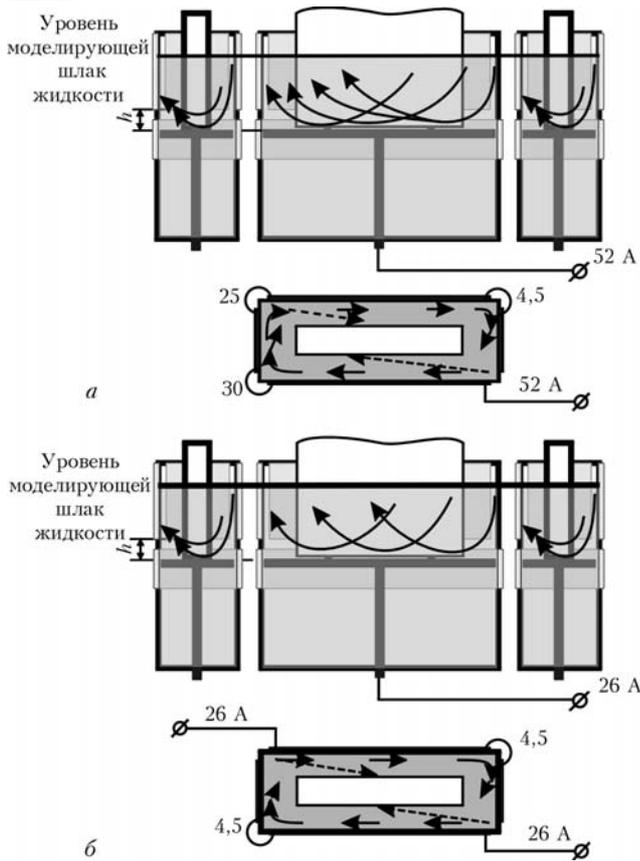


Рис. 4. Гидродинамические потоки моделирующей шлак жидкости при наплавке в плоском токоподводящем кристаллизаторе с одним (а) и двумя (б) разрывами в верхней секции;  $h = 12$  мм

наплавляемая заготовка меньше, чем на участке токоподводящий электрод–поддон (точнее, электрод–зеркало металлической ванны), такой зоной, по-видимому, следует считать зону у поверхности шлаковой ванны, примыкающую к электродам. Однако нагрев шлака (моделирующего раствора) происхо-

дит по всей контактной поверхности электрода. Часть нагретого здесь раствора расширяется, становится легче и стремится всплыть, противодействуя потоку, возникающему под действием электромагнитных сил. Противодействие сил свободной конвекции электромагнитным силам в этой области приводит к зарождению нисходящих потоков не с поверхности моделирующей шлаковую ванну раствора, а на некотором расстоянии от нее. При дальнейшем приближении поддона к токоподводящим электродам видимое зарождение нисходящих потоков смещалось к нижней границе электродов.

При электрошлаковых процессах в токоподводящем кристаллизаторе происходит растекание тока от участка токоподвода как вдоль электродов (рис. 4, цифры у медных шин, соединяющих соседние электроды), так и по всему объему шлаковой ванны. Чтобы оценить картину растекания тока в моделирующем шлак растворе, проведен ряд экспериментов. В качестве измерительного инструмента для оценки уровня тока в выбранном направлении использовали небольшой трансформатор тока, представляющий собой ферритовое кольцо с медной обмоткой. Наружный диаметр трансформатора составлял 10,5 мм, а толщина – 7 мм. Протекающий через кольцо ток в растворе возбуждает магнитный поток в сердечнике феррита, который в свою очередь наводит ЭДС в обмотке трансформатора тока. Полученное напряжение фиксировали с помощью микровольтметра.

Коэффициент пропорциональности между измеренным напряжением и регистрируемым током в растворе предварительно определяли с помощью тарировки измерительной системы.

На рис. 5, а приведена схема экспериментов. Замеры выполняли как в направлении от электродов к заготовке и вдоль горизонтального потока в различных участках по периметру кристаллизатора

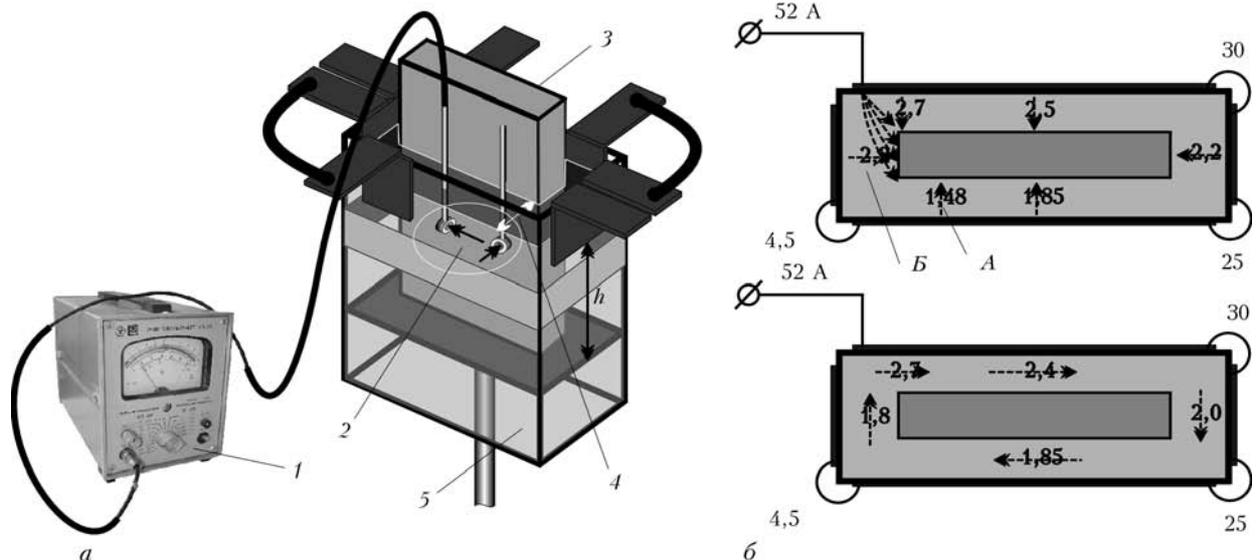


Рис. 5. Распределение тока в моделирующей шлаковую ванну растворе при наплавке в плоском токоподводящем кристаллизаторе: а – схема эксперимента; б – полученные значения тока в горизонтальной плоскости у нижнего торца токоподводящих электродов; 1 – измерительный прибор; 2 – расположение измерительного датчика в зазоре и направление измеряемых токов в модельном растворе; 3 – наплавляемая заготовка; 4 – зазор между заготовкой и стенкой модели; 5 – модель токоподводящего плоского кристаллизатора

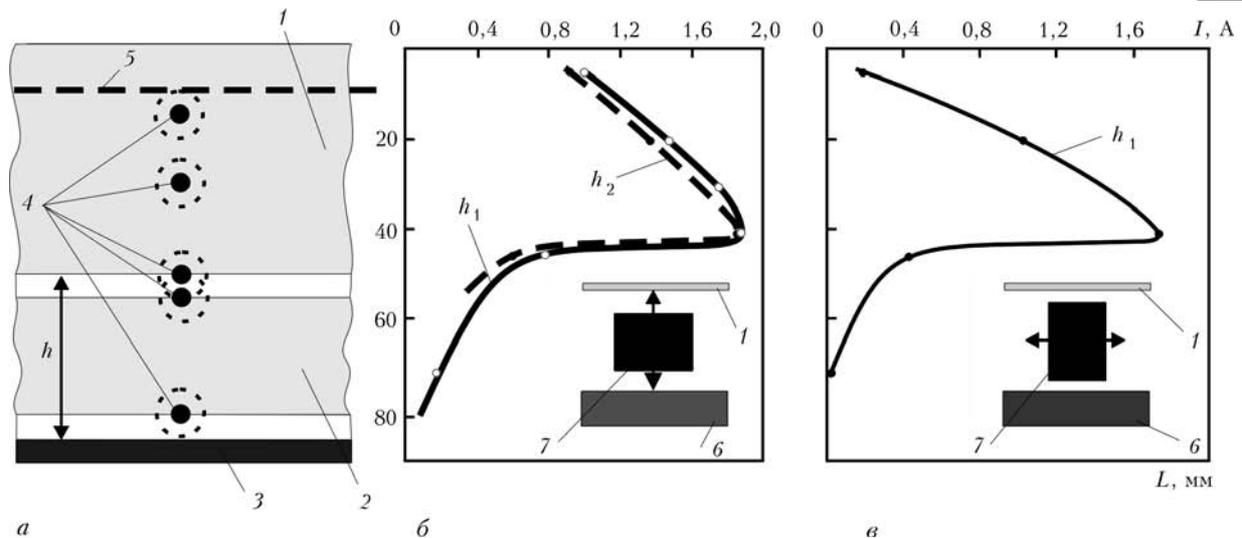


Рис. 6. Распределение тока по глубине моделирующего шлак раствора при наплавке в плоском токоподводящем кристаллизаторе: *a* — фрагмент кристаллизатора с участками замеров; *б, в* — радиальная и горизонтальная составляющие; *1* — токоподводящий электрод; *2* — медный контур промежуточной секции; *3* — поддон; *4* — участки замеров тока; *5* — уровень моделирующего шлак раствора в кристаллизаторе; *б* — заготовка под наплавку; *7* — расположение в зазоре измерительного трансформатора тока;  $h_1 = 50$  мм;  $h_2 = 12$  мм;  $L$  — глубина погружения измерительного трансформатора тока

ра, так и по высоте ванны от поверхности до поддона. Регистрируемый ток соответствовал току, протекающему в растворе в выбранном направлении через сечение, равное внутреннему диаметру (4 мм) трансформатора тока. В целом (как для схемы с одним, так и с двумя разрывами в цепи электродов) зафиксировано снижение тока в моделирующем шлак растворе по мере продвижения вдоль цепи электродов и удаления от места подключения токоподводящих кабелей. Аналогичный характер изменения тока обнаружен и в цепи токоподводящих электродов (в нашем случае 52 А–30 А–25 А–4,5 А). При измерении тока, протекающего в направлении от электродов к заготовке, наибольшее значение (2,7 А) зафиксировано в области раствора, непосредственно прилегающей к участкам подключения токоподводящих кабелей, а наименьшее (1,48 А) — в области, расположенной у противоположной стенки модели (рис. 5, б, область А). Повышение радиальной составляющей (от электрода к заготовке) тока в области Б, по-видимому, связано с ответвлением части тока от места подключения кабеля на торец наплавляемой заготовки.

Исследование распределения тока по глубине раствора показало, что наибольшие значения тока и для радиальной, и для горизонтальной (по периметру вдоль цепи электродов) составляющей находятся на уровне нижнего торца токоподводящих электродов (рис. 6). Непосредственно у поверхности раствора радиальная составляющая примерно в 5 раз превышала горизонтальную составляющую. При увеличении глубины погружения, вплоть до уровня нижнего торца токоподводящих электродов, зафиксировано плавное увеличение, а затем (в зазоре между токоподводящей секцией электродов и средней промежуточной секцией) — резкое снижение тока. На участке промежуточной секции зафиксировано плавное снижение тока. Изменение расстояния  $h$  от поддона до токоподводящих электродов от 50 до 12 мм способствовало некоторому снижению радиальной составляющей тока, а гори-

зонтальная составляющая практически не изменилась (рис. 6, б, в). Такой характер изменения тока, по-видимому, связан с тем, что если расстояние до токоподводящей секции становится меньше, чем зазор между заготовкой и кристаллизатором, то определяющую роль в распределении тока по объему раствора, моделирующего шлаковую ванну, начинает играть вертикальная составляющая тока.

**Выводы**

1. Установлено, что при наплавке в токоподводящем кристаллизаторе характер гидродинамических потоков в шлаковой ванне зависит от соотношения значений наплавляемого слоя и расстояния между токоподводящей секцией, а также уровня металлической ванны в кристаллизаторе. Если это соотношение больше 1, то обнаруживаются как вертикальные, так и горизонтальные потоки. По мере уменьшения данного соотношения интенсивность вертикальных потоков снижается, и преобладающее влияние оказывает горизонтальный поток, вращающийся вокруг наплавляемой заготовки.
2. Показано, что интенсивность вращения горизонтального потока увеличивается с повышением тока в цепи электроды токоподводящей секции–поддон и увеличением толщины наплавляемого слоя.
3. Определено, что растекание тока в шлаковой ванне неравномерно. Наибольшие значения тока и для радиальной, и для горизонтальной (по периметру вдоль цепи электродов) составляющей находятся на уровне нижнего торца токоподводящих электродов.

1. Цыгуленко К. А. Физическое моделирование гидродинамики шлаковой ванны в слябовом токоподводящем кристаллизаторе. Часть 1. Выплавка слитка // Современ. электрометаллургия. — 2008. — № 1. — С. 3–8.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
Поступила 16.01.2008



УДК 669.187.526:51.001.57

## РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ ТИТАНА В ИЭС ИМ. Е. О. ПАТОНА

Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, В. А. Березос

Представлено производство слитков титана из недробленых блоков губчатого титана способом электронно-лучевой плавки. Определены значения производительности плавки для слитков диаметрами 1200 и 850 мм, при которых глубина жидкой ванны не превышает радиуса слитка, что с точки зрения теории кристаллизации является удовлетворительным результатом. Показано высокое качество получаемых слитков диаметром 1100 мм.

Production of titanium ingots from uncrushed blocks of spongy titanium using the method of electron beam melting is described. Melting efficiency values are determined for 1200 mm and 850 mm diameter ingots whose molten pool depth does not exceed the ingot radius that is a satisfactory result from the point of view of theory of crystallization. High quality of produced ingots of 1100 mm diameter is shown.

**Ключевые слова:** блок губчатого титана; титановый слиток; электронно-лучевая плавка с промежуточной емкостью; электронно-лучевая установка; математическое моделирование

Широкое использование титановых сплавов на первый план выводит себестоимость титановой продукции, в том числе и слитков [1]. Значительному снижению цены слитков способствует введение в эксплуатацию мощных установок электронно-лучевого переплава с промежуточной емкостью, производящих крупногабаритные слитки с применением в качестве исходного материала недробленых блоков губчатого титана [2].



Рис. 1. Цех ЭЛП

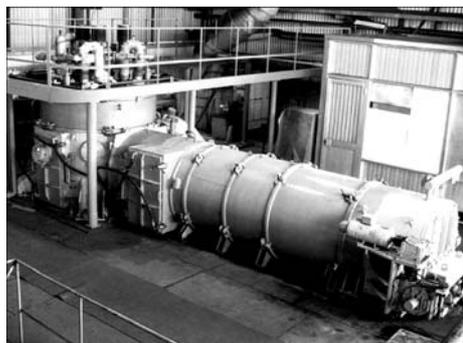


Рис. 2. Электронно-лучевая установка УЭ5812

На основе более чем 30-летнего опыта Института электросварки им Е. О. Патона в области электронно-лучевой плавки металлов создано Государственное предприятие «Научно-производственный центр «Титан».

В настоящее время в ГП «НПЦ «Титан» входит мини-завод по производству слитков круглого и



Рис. 3. Оплавленный слиток диаметром 850 мм

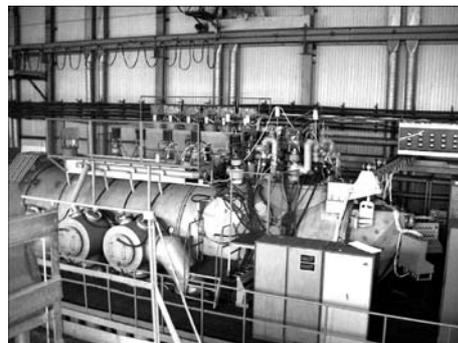


Рис. 4. Электронно-лучевая установка УЭ5810



Рис. 5. Слиток диаметром 1100 мм

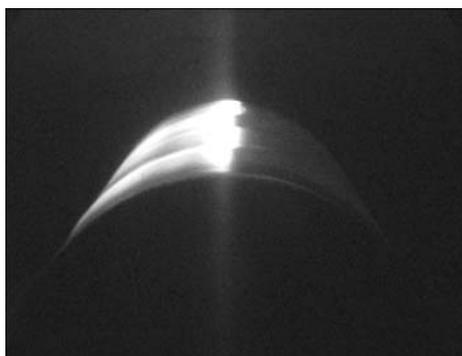


Рис. 6. Процесс оплавления слитка диаметром 1100 мм

прямоугольного сечений (шесть электронно-лучевых установок с годовой производительностью 3...5 тыс. т, в зависимости от сортамента) (рис. 1).

Для производства крупногабаритных слитков из недробленых блоков губчатого титана [3] на ГП «НПЦ «Титан» эксплуатируются электронно-лучевые установки УЭ5810 и УЭ5812.

Установка УЭ5812 (рис. 2) [4] позволяет производить из блоков губчатого титана массой до 1 т каждый слитки диаметром до 850 мм и длиной до 4500 мм (рис. 3), а электронно-лучевая установка УЭ5810 (рис. 4) из блоков массой до 4 т — диаметром до 1200 мм и длиной до 4500 мм (рис. 5).

На установке также можно оплавливать боковую поверхность слитков (рис. 6) для исключения механической обработки.

Вместе с тем, масштабный фактор оказывает значительное влияние на структуру и свойства металла слитков. Как отмечают современные исследователи, для классического процесса вакуумно-дуговой плавки существуют критические размеры слитков, выше которых нельзя получить слиток удовлетворительного качества.

Для определения условий кристаллизации крупногабаритных слитков проведены расчеты в рамках математической модели теплопереноса в цилиндрическом слитке (рис. 7) [5].

Исследования проводили путем изменения скорости плавки до 1000 кг/ч. Из рисунков видно, что

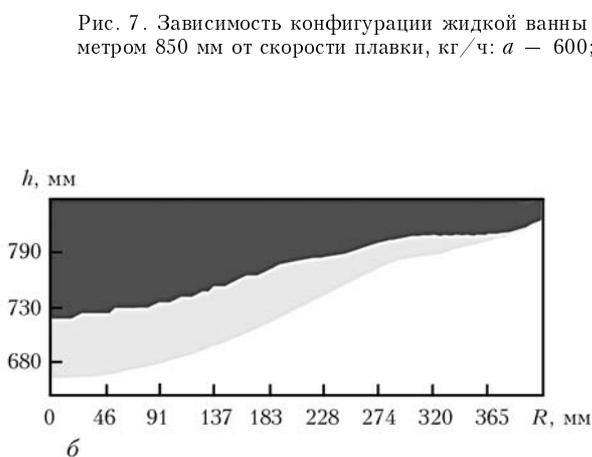
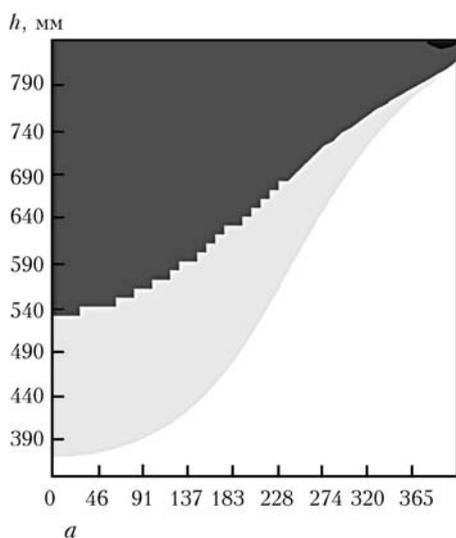


Рис. 7. Зависимость конфигурации жидкой ванны слитка диаметром 850 мм от скорости плавки, кг/ч: а — 600; б — 400

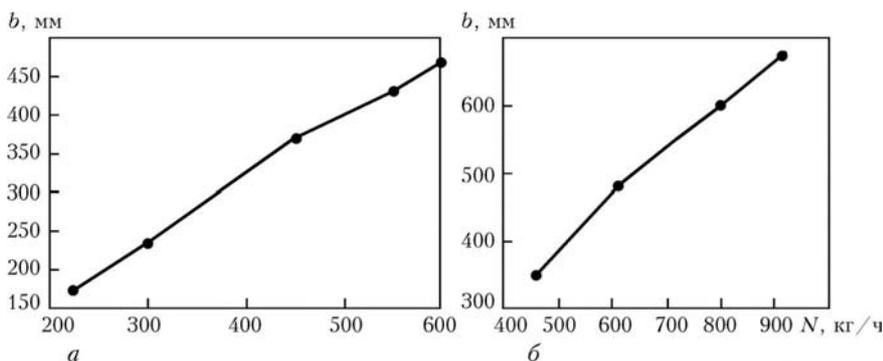


Рис. 8. Зависимость глубины жидкой ванны от производительности  $N$  плавки: а — слитка диаметром 850 мм; б — слитка диаметром 1200 мм

зависимость глубины жидкой ванны прямо пропорциональна производительности процесса (рис. 8). Установлено, что глубина жидкой ванны не превышает радиуса слитка (что с точки зрения теории кристаллизации является удовлетворительным результатом) при следующих значениях производительности плавки: для диаметра 850 мм — 550 кг/ч, диаметра 1200 мм — 800 кг/ч.

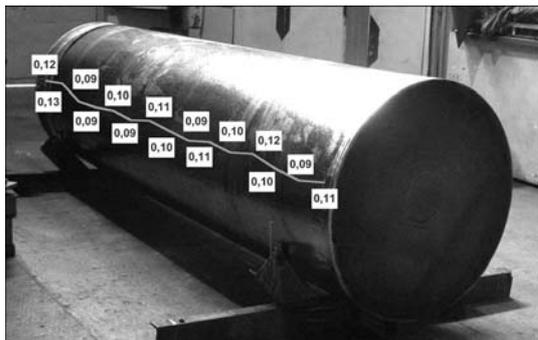


Рис. 9. Распределение кислорода в слитке диаметром 1100 мм



Рис. 10. Трубная заготовка размерами 600/400x2000 мм

Исследования химического состава слитков диаметром 1100 мм (рис. 9) показали, что содержание примесей в слитке соответствует стандарту ASTM В348-00, причем примеси несмотря на использование в качестве исходного материала цельных блоков губчатого титана практически равномерно распределены по длине слитка.

Ультразвуковой контроль слитков показал, что в них отсутствуют экзогенные неоднородности — усадочные раковины и поры, структурная неоднородность, включения. Кроме того, отсутствие значительной структурной неоднородности слитка показывает правильность математических расчетов технологических параметров плавки и стабильность ее протекания. Освоена технология производства



Рис. 11. Раскатные кольца диаметрами 1850 и 1415 мм

полых слитков (рис. 10), позволяющая исключить операцию прошивки при получении трубной заготовки и в результате снизить потери металла и затраты на производство бесшовных труб [6]. Из трубной заготовки получены титановые кольца диаметром до 2000 мм (рис. 11).

1. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В. Перспективные технологии электронно-лучевой плавки титана // Титан. — 2003. — № 2. — С. 20–25.
2. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В. Получение титановых слитков из недробленых блоков губчатого титана методом электронно-лучевой плавки // Там же. — 2005. — № 2. — С. 23–26.
3. Электронно-лучевая плавка недробленых блоков губчатого титана / Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук и др. // Соврем. электрометаллургия. — 2006. — № 4. — С. 6–9.
4. Промышленная электронно-лучевая установка УЭ-5812 / Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, В. Д. Корнейчук и др. // Там же. — 2007. — № 1. — С. 11–14.
5. Электронно-лучевая плавка титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. — Киев: Наук. думка, 2006. — 248 с.
6. Получение полых титановых слитков методом ЭЛПЕ / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Г. В. Жук и др. // Соврем. электрометаллургия. — 2004. — № 3. — С. 18–21.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 02.07.2008



УДК 533.9.07:537.533

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТОКОМ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ С ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ

Б. А. Тугай

Рассмотрены вопросы автоматического управления током электронных пушек на основе высоковольтного тлеющего разряда с холодным катодом путем изменения давления в пушке при непрерывной ее откачке и регулируемом напуске газа с помощью малоинерционного электромагнитного натекателя. Приведена математическая модель процесса автоматического управления током газоразрядной пушки и ее решение на ЭВМ. Показано влияние газодинамических характеристик систем откачки и напуска газа на процесс управления, проведено сравнение расчетных и экспериментальных переходных характеристик управления током газоразрядной электронной пушки для напыления.

Problems of automatic control of current of electron guns with a cold cathode, based on a high-voltage glowing discharge, by changing the pressure in the gun at its continuous pumping and adjustable gas leak-in using a low-inertia electromagnetic flow regulator are considered. Mathematical model of process of automatic control of gas-discharge gun current and its solution in the computer are given. The effect of hydrodynamic characteristics of systems of gas pumping and leak-in on the process of control is shown, the comparison of estimated and experimental transient characteristics of current control of gas-discharge electron gun for cladding is given.

**Ключевые слова:** газоразрядная электронная пушка; натекатель; разряд; система управления; математическая модель

В настоящее время для электронно-лучевой плавки и напыления покрытий, а также для сварки тонкостенных изделий все большее применение находят электронные пушки на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) с холодным катодом. Несмотря на сравнительно невысокую удельную мощность в пучке такие пушки имеют ряд преимуществ перед широко используемыми в электронно-лучевых технологиях пушками с термоэлектронными эмиттерами. Они отличаются длительным сроком службы холодного катода с развитой эмиссионной поверхностью, могут устойчиво работать в среде различных газов в широком диапазоне значений давления, обеспечивают формирование электронных пучков различной формы, относительно просты и надежны в работе. Их использование позволяет упростить технологическое оборудование [1]. В промышленности применяются газоразрядные пушки мощностью от единиц до сотен киловатт. В зависимости от назначения они отличаются конструктивными, электронно-оптическими и энергетическими характеристиками. Управление током газоразрядных пушек осуществляют путем изменения давления в области горения разряда с помощью регулируемого напуска газа в пушку при ее непрерывной откачке. Такой способ управления обусловлен

сильной зависимостью тока газоразрядной пушки от давления в разрядном промежутке [2]. Если в процессе работы регулировать натекание газа в пушку, изменяя давление в ней, и поддерживать неизменным ускоряющее напряжение, то можно управлять током разряда, а следовательно, и мощностью пучка во всем рабочем диапазоне пушки [3]. Регулируемый напуск газа в пушку осуществляют с помощью натекателей. Для большинства технологических процессов, где используются газоразрядные электронные пушки (ГРЭП), требуется автоматическое управление их параметрами с высокой точностью и малым временем регулирования. В отдельных случаях, особенно при запуске пушек большой мощности, когда возможны частые дуговые пробои, система напуска газа должна обеспечивать работу в режиме стабилизации давления газа в пушке или в ручном режиме управления. При этом натекатели, используемые в системах управления током пушки, должны отличаться высокой стабильностью параметров и малой инерционностью электрически управляемого привода.

Физическая модель типовой системы автоматического управления током ГРЭП с электромагнитным натекателем газа состоит из газоразрядной электронной пушки 2 с лучепроводом 7, источника высоковольтного питания пушки 3, датчика тока пушки 4, электронного регулятора 12, натекателя газа с электромагнитным приводом 11, дозирующим

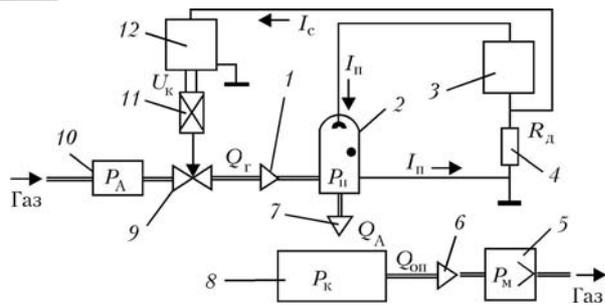


Рис. 1. Система автоматического управления током ГРЭП с электромагнитным натекателем

устройством 9 и газовой камерой 10, канала для напуска газа 1, соединяющего натекатель с пушкой, вакуумной камеры 8, вакуумпровода 6, соединяющего вакуумную камеру с вакуумным насосом 5 (рис. 1). Датчиком тока пушки является низкоомное сопротивление, включенное последовательно в низковольтный участок цепи разряда или датчик на основе эффекта Холла, включаемый в высоковольтный участок цепи разряда и имеющий высоковольтную гальваническую развязку по напряжению. Электромагнитный натекатель снабжен прямоходным электромагнитным приводом, конструктивно соединенным жестко со штоком дозирующего устройства и работающим в аналоговом режиме. Непрерывная откачка пушки осуществляется через лучепровод совместно с вакуумной камерой.

В процессе работы пушки сигнал с датчика тока разряда поступает в электронный блок управления, где сравнивается с заданным опорным напряжением, устанавливаемым в зависимости от требуемого значения тока разряда, усиливается ПИД-усилителем и поступает на обмотку электромагнита натекателя. В зависимости от силы сигнала управляющего воздействия натекатель направляет поток газа в пушку, находящуюся под непрерывной откачкой, в результате чего давление в ней устанавливается таким, при котором ток разряда соответствует заданному. Инерционность исполнительных устройств, а также газодинамических процессов откачки и напуска газов ограничивают временные характеристики управления током ГРЭП. При этом существенного улучшения характеристик системы управления током пушки достигают путем выбора оптимальных значений параметров систем откачки и напуска газа на этапе проектирования электронной пушки и вакуумной установки, а также исполнительного устройства. Такая задача связана с большим объемом экспериментальных исследований. Она значительно упрощается при компьютерном моделировании систем автоматического управления током ГРЭП.

В работе [3] приведена математическая модель системы автоматического управления током электронной пушки на основе ВТР, в которой используется электромагнитный натекатель с дозирующим устройством, выполненным в виде осесимметрично расположенных седла с плоской уплотняющей поверхностью и отверстием для протока газа в центре, а также подвижного штока с плоской торцевой по-

верхностью со стороны седла. Эта конструкция дозирующей пары характерна тем, что рабочий ход штока определяется пропускной способностью отверстия в уплотнителе и ограничен положением стопа прямоходного электромагнитного привода натекателя.

В реальных конструкциях электромагнитных натекателей с указанной дозирующей парой рабочий ход штока составляет 0,01... 0,02 мм, поэтому при изменении температурного режима натекателя вследствие различия значений коэффициентов температурного расширения материалов его конструкции изменяется зазор между штоком и седлом дозирующей пары вплоть до запираения натекателя. Это приводит к нарушению работы системы управления током пушки как в ручном, так и в автоматическом режимах. К тому же характеристика зависимости потока газа от положения штока в указанной дозирующей системе имеет существенно нелинейный характер на начальном участке, что затрудняет регулирование тока пушки при ручном управлении.

В данной работе исследуется система автоматического управления током ГРЭП с электромагнитным натекателем, в котором изменена конструкция дозирующей пары, вследствие чего уменьшена нелинейность характеристики его производительности и практически отсутствует влияние температурного режима натекателя на стабильность его работы. Это позволило эффективно использовать его как в автоматическом, так и в ручном режиме управления током пушки. Приведены математическая модель системы автоматического управления током ГРЭП и ее решение на ЭВМ, исследовано влияние газодинамических характеристик систем откачки и напуска газа на характеристики управления, показано влияние динамических характеристик электромагнитного привода натекателя на процесс управления током пушки, проведено сравнение расчетных и экспериментальных переходных характеристик процесса автоматического управления током напылительной ГРЭП.

**Математическая модель системы автоматического управления током пушки.** При составлении математической модели газодинамическую систему пушки с системой откачки рассматривали как систему с сосредоточенными параметрами, в которой не учитывали объемы вакуум-проводов и газовыделение из их поверхностей, а также потоки газов, не оказывающие заметного влияния на динамику изменения давления в ГРЭП в процессе ее работы, т. е. натекание газа в пушку и вакуумную камеру технологической установки, сорбционные процессы на поверхности разрядной камеры пушки и вакуумной камеры установки и др. Предполагалось, что откачка вакуумной камеры и газоразрядной пушки осуществляется вакуумным насосом, быстрота действия которого в значительной мере постоянна в широкой области значений давления, что характерно



для наиболее широко применяемых в электронно-лучевых установках диффузионных, ротационных и других насосов [4].

Математическую модель системы автоматического управления током ГРЭП можно представить системой дифференциальных уравнений, описывающих динамику привода натекаателя, зависимость его газовой проводимости от силы управляющего сигнала и условие баланса газовых потоков в разрядной камере пушки и вакуумной камере электронно-лучевой установки. При этом входным параметром модели является управляющее напряжение на натекателе  $U_n$ , а выходным — сигнал с датчика тока пушки  $I_p$ .

Динамика прямоходового электромагнитного привода натекаателя, работающего в аналоговом режиме, описывается уравнением баланса напряжений в цепи питания электромагнита и условием равновесия сил его механической части, которые в малых отклонениях имеют вид

$$R_k \Delta i_n + L_k \frac{d\Delta i_n}{dt} = \Delta U_n,$$

$$m_n \frac{d^2 \Delta l_n}{dt^2} = \sum_{i=1}^n \Delta F_i = \Delta F_s - \Delta F_n - \Delta F_T,$$

где  $R_k$ ,  $L_k$ ,  $i_n$ ,  $U_n$  — соответственно активное сопротивление, индуктивность, ток и напряжение в обмотке электромагнита натекаателя;  $m_n$  — масса подвижной части натекаателя;  $l_n$  — координата, определяющая положение якоря со штоком относительно седла клапана;  $F_s$  — тяговая сила электромагнита;  $F_n$  — упругая сила пружины;  $F_T$  — сила трения.

$$\Delta F_s = C_s \Delta i_n, \quad \Delta F_n = C_n \Delta l_n,$$

$$\Delta F_T = C_k \frac{dl_n}{dt},$$

где  $C_s$  — крутизна тяговой характеристики электромагнита;  $C_n$  — коэффициент жесткости пружины;  $C_k$  — коэффициент силы трения.

Для уменьшения влияния температурного режима на стабильность работы натекаателя конструкция его дозирующей пары изготовлена в виде штока 1, на торцевой поверхности которого выполнен цилиндрический выступ меньшего диаметра, и седла 2 в виде полого цилиндра, внутри которого перемещается выступ штока (рис. 2). В запертом состоянии натекаателя уплотняющими поверхностями дозирующей пары являются плоские поверхности торца штока и полого цилиндрического седла. При перемещении штока в процессе регулирования проводимости натекаателя  $S_d$  определяется проводимостями зазоров, образованных поверхностями уплотнения  $S_{d1}$  и цилиндрическими поверхностями отверстия седла и выступа штока  $S_{d2}$ , а также проводимостью цилиндрического отверстия седла  $S_{d3}$ , которые яв-

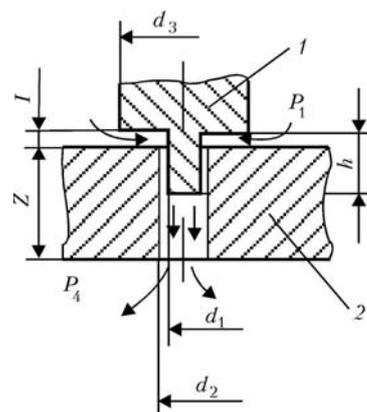


Рис. 2. Схематическое изображение конструкции дозирующей пары натекаателя

ляются функциями осевого перемещения штока относительно седла  $l_n$ . В такой конструкции обеспечивается ход штока на расстояние до нескольких миллиметров, что практически исключает влияние изменения температуры натекаателя на его газовую проводимость.

Выражение для определения пропускной способности натекаателя  $S_d$  можно записать в виде суммы последовательно включенных проводимостей  $S_{d1}$ ,  $S_{d2}$ ,  $S_{d3}$ :

$$\frac{1}{S_d} = \frac{1}{S_{d1}} + \frac{1}{S_{d2}} + \frac{1}{S_{d3}}.$$

Проводимость  $S_{d1}$ , образованную плоскими уплотняющими поверхностями штока и седла, можно рассматривать как проводимость прямоугольного трубопровода с сечением  $a_1 \times e_1$  и длиной  $c_1$ , определяемыми из следующих выражений:

$$a_1 = p(d_3 - d_2); \quad b_1 = \frac{h}{2}; \quad c_1 = \frac{d_3 - d_2}{2}.$$

Тогда, согласно работе [4], газовая проводимость данного участка вакуум-провода для воздуха при ламинарном потоке будет иметь вид

$$S_{d1} = A_1 \bar{p}_1 l^2,$$

где  $A_1 = 5,8 \cdot 10^8 k_1 d_2^2 (d^3 - d^2)^{-1}$ ;  $k_1$  — эмпирический коэффициент, значение которого зависит от соотношения  $a_1/e_1$ ;  $p_1$  — среднее значение давления газа на данном участке вакуум-провода.

Проводимость  $S_{d2}$  второго участка, образованная двумя цилиндрическими поверхностями выступа штока и отверстия в седле дозирующей пары, можно также рассматривать как прямоугольный вакуум-провод с сечением  $a_2 \times e_2$  и длиной  $c_2$ , которые вычисляются из соотношений

$$a_2 = p(d_2 - d_1); \quad b_2 = \frac{d_2 - d_1}{2}; \quad c_2 = \frac{h - l}{2}.$$

Тогда газовая проводимость  $S_{d2}$  для воздуха при ламинарном потоке определится как



$$S_{л2} = \frac{A_2 \bar{p}_2}{h - l},$$

где  $A_2 = 488k_2 p^2 (d_2 - d_1)^2$ ;  $k_2$  — эмпирический коэффициент, значение которого зависит от соотношения  $a/\sigma$ ;  $\bar{p}_2$  — среднее значение давления на участке вакуум-провода с газовой проводимостью  $S_{л2}$ .

Проводимость  $S_{л3}$ , образованная цилиндрическим отверстием в седле дозирующей пары с диаметром  $d_c = d_2$  и высотой  $H_c = z - h - l$ , определяется по формуле

$$S_{л3} = \frac{a_3 \bar{p}_3}{z - h - l}.$$

где  $A_3 = 1360d_2^4$  (для воздуха);  $\bar{p}_3$  — среднее значение давления на участке вакуум-провода с проводимостью  $S_{л3}$ .

Тогда общая проводимость дозирующей пары натекателя будет определяться из выражения

$$S_{л} = p_1 l^2 + \frac{A_2 p_2}{hl} + \frac{A_3 p_3}{z - h - l}.$$

Проводимость газового канала  $S_{к}$ , расположенного между натекателем и пушкой, существенно больше проводимости натекателя  $S_{л}$  и при вычислении суммарной проводимости канала напуска газа в пушку  $S_{г}$  ею можно пренебречь. На характеристики регулирования существенное влияние оказывает транспортное запаздывание газа, обусловленное перемещением молекул газа по каналу от натекателя к пушке. Без учета эффекта размывания фронтов газового потока в трубопроводе канал напуска газа можно рассматривать как звено с чистым временным запаздыванием  $\tau_3$  в контуре регулирования. Тогда выражение для суммарной проводимости газового канала с учетом временного запаздывания будет иметь вид

$$S_{г}(t) = \left( p_1 l^2 + \frac{A_2 p_2}{hl} + \frac{A_3 p_3}{z - h - l} \right) (t - \tau_3).$$

Модель газодинамической системы пушки с системой откачки можно представить системой дифференциальных уравнений, описывающих условия баланса газовых потоков в разрядной камере пушки и вакуумной камере электронно-лучевой установки. Основными потоками, определяющими давление в разрядной камере пушки, являются регулируемый поток газа  $Q_{г}$ , поступающий в ГРЭП через натекаТЕЛЬ и вакуум-провод, соединяющий натекаТЕЛЬ с разрядной камерой пушки, и поток газа, откачиваемый из пушки через лучепровод  $Q_{л}$ . Уравнение баланса газовых потоков в разрядной камере ГРЭП можно записать в виде

$$V_{п} \frac{dp_{п}}{dt} = Q_{г} - Q_{л},$$

где  $V_{п}$  — объем разрядной камеры пушки;  $p_{п}$  — давление газа в пушке.

Регулируемый поток газа  $Q_{г}$  определяется проводимостью  $S_{г}$  и разностью давлений в натекателе  $p_A$  и пушке  $p_{п}$

$$Q_{г} = S_{г} (p_A - p_{п}).$$

Поток газа, откачиваемого из пушки через лучепровод  $Q_{л}$ , определяется проводимостью лучепровода и разностью давлений в пушке и вакуумной камере электронно-лучевой установки.

$$Q_{л} = S_{л} (p_{п} - p_{к}),$$

где  $S_{л}$  — проводимость лучепровода;  $p_{к}$  — давление в вакуумной камере электронно-лучевой установки.

Основными потоками, определяющими давление в вакуумной камере электронно-лучевой установки в ГРЭП, являются поток газа, поступающего из пушки в вакуумную камеру  $Q_{л}$ , и поток газа, откачиваемого из вакуумной камеры вакуумным насосом  $Q_{от}$ . Уравнение баланса газовых потоков в вакуумной камере электронно-лучевой установки можно записать в виде

$$V_{к} \frac{dp_{к}}{dt} = Q_{л} - Q_{от},$$

где  $V_{к}$  — объем вакуумной камеры.

Поток газа, откачиваемого из вакуумной камеры, пропорционален скорости откачки камеры  $S_{от}$  и давлению в ней  $p_{к}$ ,  $Q_{от} = S_{от} p_{к}$ .

Быстрота откачки камеры определяется быстротой действия вакуумного насоса  $S_{п}$  и проводимостью вакуум-провода  $S_{в}$ , соединяющего вакуумную камеру и вакуумный насос,

$$\frac{1}{S_{от}} = \frac{1}{S_{п}} + \frac{1}{S_{в}}.$$

Проводимость  $S_{в}$  определяется геометрией вакуум-провода, зависит от давления в вакуум-проводе и может быть рассчитана с помощью уравнений динамики разреженного газа.

Быстрота действия вакуумного насоса, согласно работе [4], определяется по формуле

$$S_{п} = S_{р} \left( 1 - \frac{p_{м}}{p_{к}} \right),$$

где  $S_{р}$  и  $p_{м}$  — расчетная быстрота действия насоса и предельное давление в насосе (параметры, которые приводятся предприятием-изготовителем в техническом паспорте на насос).

Тогда выражение для определения потока откачиваемого газа из вакуумной камеры будет иметь вид

$$Q_{от} = \frac{1}{\frac{1}{S_{в}} + \frac{1}{S_{р}}} \left( 1 - \frac{p_{м}}{p_{к}} \right) p_{к} = \frac{S_{в} S_{р}}{S_{в} + S_{р}} (p_{к} - p_{м}).$$

Зависимость тока пушки от давления описывается эмпирическим соотношением

$$I_{п} = a p_{п}^m U_{п}^n \quad (1)$$



где  $a, m, n$  — постоянные, зависящие от рода газа, материала катода, геометрии электродов. Причем  $m$  может изменяться в пределах  $2 \dots 4$ .

Выходным параметром объекта управления является напряжение сигнала обратной связи  $U_{o.c}$ , поступающего на электронный регулятор с датчика тока пушки:

$$U_{o.c} = K_d I_n.$$

Математическую модель для ГРЭП как объекта, в котором стабилизируется ток разряда путем изменения давления в разрядном промежутке с помощью автоматически управляемого электромагнитного натекателя, можно записать как

$$\begin{cases} R_n i_n + L_k \frac{di_n}{dt} = U_n, \\ m_n \frac{d^2 l_n}{dt^2} = C_3 i - C_n I_n - C_k \frac{dl_n}{dt}, \\ S_r(t) = \left( p_1 l^2 + \frac{A_2 p_2}{hl} + \frac{A_3 p_3}{(z-h-l)} \right) (t - \tau_3), \\ V_n \frac{dp_n}{dt} = S_r(p_A - p_n) - S_d(p_n - p_k), \\ V_k \frac{dp_k}{dt} = S_d(p_n - p_k) - \frac{S_b S_p}{S_b + S_p} (p_k - p_m), \\ I_n = a p_n^m U^n; \quad U_{o.c} = k_d I_n. \end{cases} \quad (2)$$

Полученная система уравнений является нелинейной. Для ее решения разработана программа, позволяющая моделировать динамику отдельно взятого объекта или объекта в составе замкнутой системы и учитывающая влияние нелинейностей, а также запаздывание в канале напуска газа. В замкнутой системе использовали ПИД-регулятор с передаточной функцией

$$W_{per}(p) = k_{per} \left( 1 + \frac{1}{T_n p} + T_n p \right),$$

где  $k_{per}$  — коэффициент передачи регулятора;  $T_n$  — время издрорма;  $T_p$  — время предварения.

**Численное решение математической модели системы автоматического управления током пушки.** Решение системы уравнений в нелинейном виде производили на ЭВМ методом Эйлера [5, 6]. Для реализации метода Эйлера система дифференциальных уравнений

$$\frac{dY(t)}{dt} = F(t, Y)$$

представлялась следующим образом:

$$\frac{Y_{n+1} - Y_n}{\tau} - F(t_n, Y_n) = 0,$$

где  $n$  — номер шага решения;  $t$  — шаг по времени;  $Y$  — вектор решений системы;  $F$  — функция времени текущего состояния объекта исследования.

В соответствии с этим система уравнений (2) при переходе к конечно-разностным уравнениям без

учета изменения шага интегрирования по времени имеет следующий вид:

$$\begin{cases} i_n^n = f(p_n^{n-1}, U_n); \\ i_n^{n+1} = i_n^n + \frac{U_n - R_y i_n^n}{L_k} \tau; \\ l_n^{n+1} = l_n^n + \tau y; \\ y^{n+1} = y + \left[ \frac{c_3}{m_n} i_n^n - \frac{c_n}{m_n} I_n^n - \frac{c_k}{m_n} y^n \right] \tau; \\ S_d^n = C_n I_n^n; \\ p_n^{n+1} = p_n^n + \frac{S_d^{n+1} p_A^{n-Z} S_d (p_n^n - p_k^n)}{V_n} \tau; \\ p_k^{n+1} = p_k^n + \frac{S_d (p_n^{n+1} - p_k^n) - \frac{S_b S_p}{S_b + S_p} (p_k^n - p_m)}{V_k} \tau; \end{cases}$$

где  $y = \frac{dl_n}{dt}$ ;  $Z$  — запаздывание в количестве шагов  $t$  по времени. Верхние индексы при переменных указывают номер шага по времени.

В программе предусмотрена возможность изменения коэффициентов системы уравнений в процессе выполнения программ, а также модифицирование нелинейностей, входящих в эти уравнения, путем изменения соответствующих подпрограмм-функций.

При установлении пропускной способности дозирующей пары натекателя  $S_d$ , условно разделенной нами на три характерных участка, применяли приближенные методы расчета, поскольку при ламинарном течении газов в формулы расчета пропускной способности каждого из участков вакуум-провода входит среднее значение давления газа на этом участке, которое в свою очередь зависит от его пропускной способности.

Для определения давления газа на выделенных участках вакуум-провода, образованного дозирующей парой натекателя, разделяли их на большое количество приращений давления  $dp$ . Значения  $dp$  зависят от разности давлений на входе и выходе вакуум-провода и количества приращений  $dp$ . Чем больше количество приращений, тем точнее полученный результат, однако при этом возрастает количество вычислений и время, необходимое для расчета. В нашем случае ограничились количеством приращений  $kd = 50$ . Исходя из того, что рассчитываемый вакуум-провод условно разделен нами на три характерных участка, среднее давление на каждом из них определялось как

$$\bar{p}_1 = \frac{p_1 + p_2}{2}; \quad \bar{p}_2 = \frac{p_2 + p_3}{2}; \quad \bar{p}_3 = \frac{p_3 + p_4}{2},$$

где  $p_1 = p_{вх}$ , и  $p_4 = p_{вых}$  — уровни давления газа соответственно на входе и выходе натекателя, значения которых известны;  $p_2, p_3$  — давления газа на границе условного раздела участков вакуум-провода, значения которых неизвестны. Определение значений давления  $p_2$  и  $p_3$  производилось в каждом цикле:  $p_2 = p_1 - s dp$ , где  $s$  — счетчик цикла и для первой итерации  $s = 1$ ;  $p_3 = p_1 - z dp$ , где  $z$  — также



счетчик цикла,  $z = s + 1$ . За действительные принимали такие значения давления, с которыми выполняется условие непрерывности потока с наибольшей достоверностью. Для этого в программе вычисляли некую величину  $ek$ , характеризующую ошибку вычисления истинных значений давления и проводимости. Математически это выглядит следующим образом:

$$ek = ((p_1 - p_2)S_{д1} - (p_2 - p_3)S_{д2})^2 + (p_2 - p_3)S_{д2} - (p_3 - p_4)S_{д3})^2.$$

В данном выражении вычисляется разница потоков в первом и втором, а также во втором и третьем вакуум-проводах. За действительные принимают такие значения, для которых  $ek$  является наименьшим. Разницы потоков возводили в квадрат во избежание такой ситуации, при которой возможно появление больших отрицательных значений  $ek$  и, соответственно, значительное увеличение ошибки вычислений.

Разработанная программа позволяет результат решения системы уравнений выводить на экран компьютера в виде графика переходной характеристики и допускает наложение вариантов решения в заданной системе координат. Графики или их серии заносятся в память в виде отдельных файлов, что позволяет сопоставлять на экране компьютера варианты решений при оптимизации параметров системы автоматического управления током пушки.

**Анализ процесса автоматического управления током пушки на ЭВМ.** Цель моделирования заключалась в исследовании влияния параметров элементов и звеньев канала управления на переходные характеристики процесса управления током ГРЭП и выборе значений коэффициентов уравнений движения системы и параметров настройки электронного регулятора, обеспечивающих требуемые характеристики управления.

Выбор значений коэффициентов уравнений движения производили для условий работы системы автоматического управления током с ГРЭП мощностью до 7 кВт, установленной на промышленной вакуумной установке для напыления тонких пленок УРМ027. Значения задаваемых коэффициентов определяли из паспортных данных на оборудование, а неизвестных — расчетным путем.

Расчет коэффициентов производили следующим образом. Из семейства вольт-амперных характеристик пушки  $I_{п} = f(U_{п}, p_{п})$  выбирали требуемый режим работы пушки  $I_{п} = 0,4$  А,  $U_{п} = 10$  кВ, определяли давление в пушке для данного режима работы  $p_{п} = 1,3$  Па. Постоянные коэффициенты  $a$  и  $m$  из зависимости (1) для данного режима работы пушки вычисляли методом наименьших квадратов. Затем определяли режимы течения газа через лучепровод пушки и вакуум-провод, соединяющий вакуумную камеру с вакуумным насосом, а также значения проводимостей  $S_{д}$  и  $S_{в}$ . Для заданной конструкции до-

зирующего узла натекателя установили проводимость натекателя  $S_{д}$ .

Начальные значения постоянных коэффициентов  $R_{п}$ ,  $L_{к}$ ,  $m_{п}$ ,  $C_{э}$ ,  $C_{п}$ ,  $C_{к}$ , характеризующих динамику натекателя, определяли по формулам для расчета динамических характеристик электромагнитных механизмов, приведенных в работах [7] и др., а затем в процессе моделирования корректировали для получения желаемой формы переходной характеристики управления.

Выбранный аналоговый режим работы натекателя обеспечивали согласованием крутизны тяговой характеристики электромагнита и жесткости пружины на рабочем участке натекателя.

Влияние параметров элементов и звеньев системы на характеристики управления определяли по реакции системы на ступенчатое входное воздействие при различных значениях коэффициентов уравнений. Исследования проводили при замкнутом контуре регулирования с ПИД-регулятором.

На рис. 3 приведены переходные характеристики процесса автоматического управления током пушки в моменты ее включения при различных значениях параметров натекателя.

Путем уменьшения индуктивности катушки  $L_{к}$ , массы якоря электромагнита  $m_{п}$  (рис. 3, а, б), увеличения жесткости пружины  $C_{п}$  и крутизны его тяговой характеристики  $C_{э}$  повышали скорость реакции системы управления на возмущающее воздействие. При разработке механической части натекателя очень важно правильно подобрать соотношение параметров  $m_{п}$ ,  $C_{э}$ ,  $C_{п}$ ,  $C_{к}$ . Увеличение массы якоря до некоторого значения переводит электромагнит в режим автоколебаний (рис. 3, б), т. е. в данном случае масса подвижной части натекателя  $m_{п}$  является раскачивающим фактором, а коэффициент силы трения  $C_{к}$  — полезным демпфирующим фактором, успокаивающим колебания.

Установлено также, что с уменьшением объема разрядной камеры пушки  $V_{п}$  и увеличением газовой проводимости лучепровода  $S_{д}$  (рис. 3, в), уменьшается постоянная времени напуска и откачки газа из пушки, что улучшает динамические характеристики регулирования. Однако с увеличением проводимости  $S_{д}$  увеличивается расход рабочего газа в пушке и повышается давление в вакуумной камере электронно-лучевой установки  $p_{к}$  при заданном режиме работы пушки. Уменьшение проводимости вакуумпровода между вакуумной камерой и вакуумным насосом оказывает демпфирующее действие на процесс регулирования, однако при этом уменьшается быстрота откачки вакуумной камеры установки. Резкое ухудшение устойчивости системы и качества регулирования вызывает увеличение времени запаздывания  $\tau_3$  в канале напуска газа, соединяющем натекатель с пушкой (рис. 3, г). Влияние запаздывания на качество регулирования увеличивается с уменьшением объема  $V_{п}$  и проводимости  $S_{д}$ .

В результате проведенного моделирования на ПЭВМ установлено, что в случае применения ма-

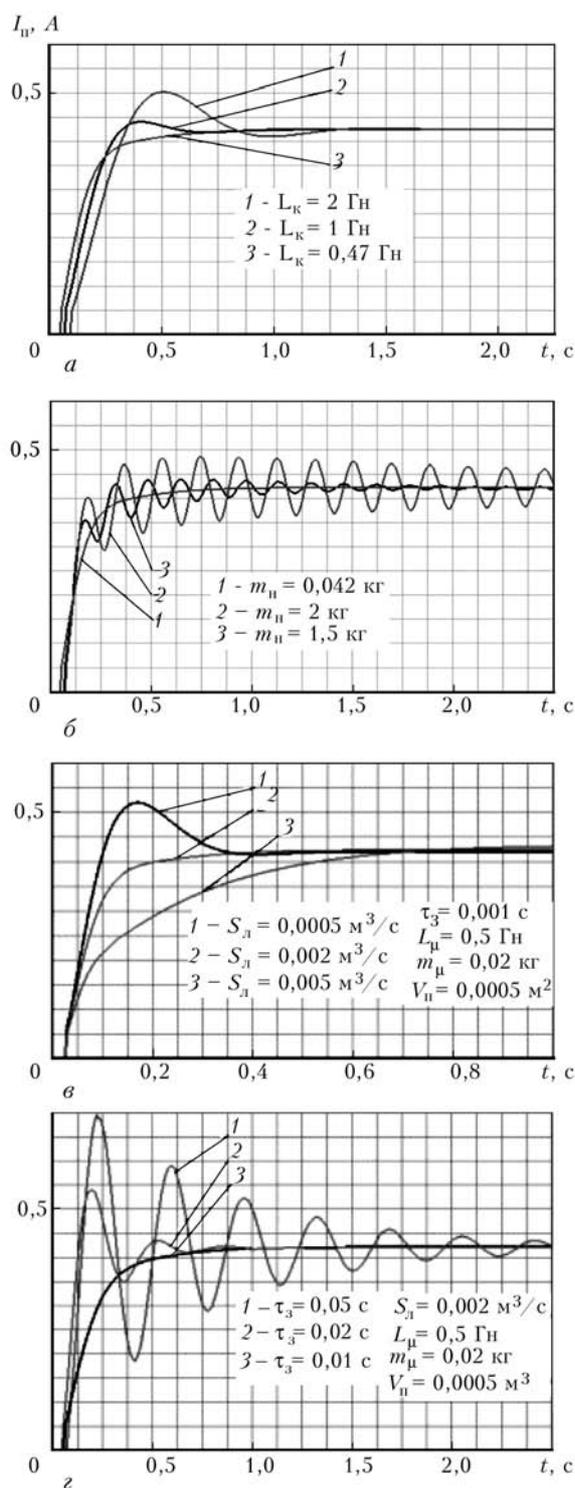


Рис. 3. Расчетные переходные характеристики, иллюстрирующие влияние параметров газодинамической системы пушки на переходные характеристики регулирования: *a* — индуктивность катушки электромагнита натекаателя  $L_k$ ; *б* — масса якоря электромагнита натекаателя  $m_n$ ; *в* — газовая проводимость лучепровода  $S_n$ ; *г* — время запаздывания  $\tau_3$  в канале напуска газа

лоинерционного электромагнитного натекаателя характеристики процесса управления током ГРЭП определяются газодинамическими характеристиками пушки, систем откачки и напуска газа. При этом минимальное время регулирования может составлять десятки и сотни миллисекунд.

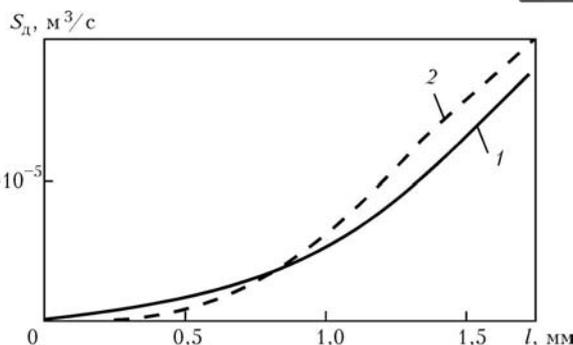


Рис. 4. Зависимость пропускной способности дозирующего узла натекаателя от хода штока: 1 — расчет; 2 — эксперимент

**Экспериментальное исследование системы автоматического управления током пушки.** По результатам исследований разработана система автоматического управления током напылительной ГРЭП с малоинерционным электромагнитным натекаателем. Проведено экспериментальное исследование характеристик натекаателя и переходных характеристик процесса автоматического управления током напылительной пушки в реальных условиях, что позволило произвести верификацию результатов моделирования с полученными экспериментальными данными.

Установлено, что графики зависимости пропускной способности натекаателя от положения штока дозирующей пары, полученные экспериментально и расчетным путем (рис. 4), не имеют существенно нелинейных участков. Незначительное расхождение кривых объясняется погрешностями определения давления газа на участках газового канала дозирующей пары натекаателя и эмпирических значений коэффициента  $k$ , зависящего от соотношения характерных геометрических размеров вакуум-провода, а также влиянием упругой деформации уплотнителя из фторопласта, не учтенной при составлении математической модели и заметно сказывающейся на начальном участке кривых. Кроме того, в разработанном натекаателе основные статические параметры практически не зависят от изменения его температуры, что позволяет эффективно использовать натекаатель в качестве исполнительного устройства в системах управления током ГРЭП в автоматическом и ручном режимах работы.

На рис. 5 приведены экспериментальные переходные характеристики процесса автоматического управления током напылительной ГРЭП в моменты ее включения при различных значениях пропускной способности лучепровода пушки, через который производится ее откачка. В случае оптимизации параметров натекаателя для работы с напылительной пушкой, проводимость лучепровода в которой составляла  $0,002 \text{ м}^3/\text{с}$ , время выхода пушки на номинальный режим достигало примерно 300 мс при аperiodическом характере переходного процесса. При уменьшении пропускной способности лучепровода до  $0,0005 \text{ м}^3/\text{с}$ , что обеспечивает более эффективную развязку пушки и технологической камеры по давлению, переходная характеристика процесса управления током пушки имела колебательный харак-

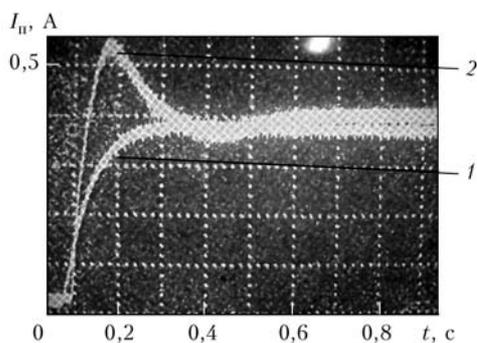


Рис. 5. Оциллограммы переходных характеристик процесса автоматического управления током напылительной ГРЭП при  $S_d$ , м<sup>3</sup>/с: 1 — 0,002; 2 — 0,005

тер с затуханием. При этом перерегулирование равнялось не более 25 %, а время регулирования — около 500 мс. Увеличение аperiodичности переходной характеристики в этом случае при неизменных других параметрах достигалось экспериментально путем выбора оптимальных значений интегральной и дифференциальной составляющих передаточной характеристики электронного регулятора. При этом уменьшить время выхода пушки на рабочий режим не удавалось. Необходимая аperiodичность переходной характеристики процесса управления током пушки и малое время регулирования достигались при выборе расчетным путем с последующей экспериментальной доводкой оптимальных значений параметров натекателя и газодинамических характеристик пушки и системы откачки.

Сравнение экспериментальных переходных характеристик с расчетными (рис. 3, в, рис. 5) показали, что их отличие по уровню перерегулирования и времени выхода на рабочий режим составляет 15... 20 %, что объясняется влиянием погрешностей при определении газодинамических характеристик системы откачки и напуска газов, параметров электромагнитного натекателя и др.

## Выводы

1. Показано, что предложенная математическая модель процесса газодинамического управления током пушки и реализация ее решения на ПЭВМ позволяют применять компьютерное моделирование при проектировании систем автоматического управления током ГРЭП с холодным катодом, а также других газоразрядных источников заряженных частиц, работающих в условиях непрерывной откачки газа.

2. Установлено, что переходные характеристики, полученные расчетным путем и экспериментально, хорошо коррелируются и это подтверждает корректность данной модели процесса автоматического управления током ГРЭП газодинамическим способом.

3. Определено, что минимальное время регулирования тока газоразрядных пушек путем изменения давления в разрядном промежутке, ограниченное инерционностью газодинамических процессов в пушке, системах откачки и напуска газов, для реальных систем может составлять десятки и сотни миллисекунд, что позволяет эффективно управлять током пушек, а также осуществлять программное управление мощностью электронного пучка во времени в соответствии с требованиями конкретного технологического процесса.

4. С применением компьютерного моделирования разработаны малоинерционные электромагнитные натекатели и системы автоматического управления током разряда путем изменением давления, обеспечивающие эффективную работу ГРЭП различного назначения в условиях проводимых технологических процессов. При этом минимальное время регулирования тока зависит от газодинамических характеристик пушки и вакуумной установки и составляет сотни миллисекунд, а погрешность регулирования не превышает 2...3 %.

1. Денбовецкий С. В., Мельник В. И., Новиков А. А. Технологические возможности источников электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой // Междунар. конф. по электронно-лучевым технологиям (Варна, Болгария, 1985). — Варна, 1985. — С. 169–164.
2. Плазменные процессы в технологических пушках / М. А. Завьялов, Ю. Е. Крейндел, А. А. Новиков, Л. П. Шантурин. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 250 с.
3. Моделирование процесса управления током газоразрядной электронной пушки / С. В. Денбовецкий, А. И. Кубрак, В. И. Мельник, Б. А. Тугай // Электроника и связь. — 1997. — Вып. № 2, ч. II. — С. 266–270.
4. Вакуумная техника: Справочник / Е. С. Фролов, В. Е. Миничев, А. Т. Александрова и др. — М.: Машиностроение, 1985. — 360 с.
5. Иващенко Н. Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. — М.: Машиностроение, 1978. — 4-е изд. — 736 с.
6. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. Учеб. пособие для вузов. — М.: Наука, 1989. — 43 с.
7. Электромеханические аппараты автоматики / Б. К. Буль, О. Б. Буль, В. А. Азанов, В. Н. Шоффа. — М.: Высш. шк., 1988. — 303 с.

Нац. техн. ун-т «Киевский политехнический институт»

Поступила 07.02.2008



# ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЕ РАФИНИРОВАНИЕ ПЛАТИНЫ И СПЛАВОВ НА ЕЕ ОСНОВЕ. Сообщение 2. Электронно-лучевое рафинирование сплавов на основе платины

**В. А. Савенко, Н. И. Гречанюк, О. В. Чураков**

Проведено детальное исследование рафинирования сплавов на основе платины. Разработана промышленная электронно-лучевая технология получения сплавов на основе платины.

Comprehensive investigation of refining alloys on platinum base was carried out. Industrial electron beam technology for producing alloys on platinum base has been developed.

*Ключевые слова: электронно-лучевой переплав; платиновые металлы и сплавы; примесные элементы; режимы плавки*

В работе [1] представлены результаты получения платины высокой чистоты (не менее 99,99 % мас.). Настоящая работа посвящена проблеме получения сплавов на основе платины.

Лом платиновых металлов и сплавов (в основном лом стеклоплавильных аппаратов, фильерных питателей, химической посуды) содержит значительное количество стекла и ряд металлических примесей. Стекло состоит из следующих оксидов, мас. %: 50... 60 SiO<sub>2</sub>, 8... 17 CaO, 7... 15 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3... 10 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1... 2 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Содержание примесей в платиновых металлах и сплавах на основе платины в значительной мере зависит от способов их получения. В промышленности их существует несколько:

гидрометаллургический аффинаж с получением губки платины, порошка родия и последующий индукционный переплав в керамическом тигле;

индукционная плавка в керамическом тигле на воздухе и вакуумно-индукционная плавка в керамическом тигле;

индукционная плавка в керамическом тигле на воздухе и вакуумно-индукционный переплав в медном секционном водоохлаждаемом тигле;

индукционная плавка в керамическом тигле на воздухе и вакуумно-дуговой переплав с нерасходуемым электродом;

индукционная плавка в керамическом тигле на воздухе и вакуумно-дуговой переплав с расходуемым электродом;

индукционная плавка в керамическом тигле на воздухе и электронно-лучевой переплав;

индукционная плавка в керамическом тигле на воздухе и зонная электронно-лучевая плавка.

Несмотря на использование большого количества длительных технологических операций и химических реагентов гидрометаллургический передел позволяет получать платиновые металлы достаточной чистоты отдельно (поэлементно).

Индукционная плавка в керамическом тигле на воздухе дает возможность хорошо перемешивать и усреднять сплавы, окислять часть примесей и ассимилировать их в материал тигля. При окислительной плавке практически не меняется концентрация таких металлов, как палладий, золото, медь. В то же время в процессе индукционной плавки невозможно достичь требуемой чистоты металла по ряду металлических и газовых примесей. Массовая доля кислорода достигает 0,05%. Недостатком этого вида плавки является загрязнение расплава частицами материала тигля.

Индукционной плавке в секционном водоохлаждаемом тигле (холодном тигле) присущи преимущества индукционной тигельной плавки, при этом расплав не загрязняется материалом тигля. Этот способ позволяет производить плавку металлов при любом давлении и получать слитки высокого качества, однако он характеризуется весьма низким энергетическим КПД из-за больших тепловых потерь в медных стенках тигля [2].

Вакуумно-дуговой переплав с нерасходуемым электродом способствует неизбежному загрязнению расплава вольфрамом. Вакуумно-дуговой переплав платины и платиновых сплавов с расходуемым электродом позволяет снизить содержание кислорода в пять раз, углерода и азота в девять раз, фтора, маг-



**Таблица 1. Химический состав платинородиевого сплава после окислительной индукционной плавки в периклазовом тигле и последующей ЭЛП**

Наименование продукта	Массовая доля элементов, %														
	Pt	Rh	Pd	Ir	Fe	Cu	Ni	Pb	Al	Mg	Si	Sn	Zn	B	Ca
Исходный лом платинородиевого сплава	92,64	6,68	0,08	0,0012	0,034	0,08	0,007	0,065	0,040	0,040	0,160	0,009	0,070	0,070	0,02
Слиток платинородиевого сплава после окислительной индукционной переплава	92,89	6,85	0,082	0,0014	0,012	0,077	0,002	0,009	0,005	0,030	0,007	0,002	0,008	0,001	0,004
Слиток платинородиевого сплава после ЭЛП	92,95	6,99	0,012	0,0015	0,010	0,004	0,0005	0,0005	0,001	0,004	0,001	0,0005	0,0005	0,0004	0,0005
ТУ 48-1-169-83	93±0,3	7±0,3	Σ 0,15		0,025	Σ 0,025		0,005	0,005	0,005	0,005		Σ 0,02		Не регламентируется

ния, хлора, серы, калия, кальция, железа, цинка, брома, мышьяка, сурьмы, бария и свинца — на порядок и более, однако содержание меди все же остается высоким. При электродуговой вакуумной плавке очистка сплава происходит не только в результате удаления примесей в газовую фазу, но и за счет их отнесения к верхней (прибыльной) части слитка.

Для подготовки электрода исходные материалы прессуют или сваривают способом аргоно-дуговой сварки вольфрамовым электродом, что является недостатком данного способа плавки и приводит к дополнительным затратам. При этом способе металл ограниченное время находится в расплавленном состоянии и, следовательно, процесс рафинирования не успевает протекать достаточно полно. Выход в годный слиток составляет 41% [3].

Для более глубокой очистки от примесей используют способ электронно-лучевой плавки (ЭЛП), который позволяет снизить содержание газообразных примесей на порядок, значительно уменьшить количество металлических примесей за счет вакуумной дистилляции — перехода примесей в газовую фазу веществ с более высоким, чем у основного металла, парциальным давлением. При ЭЛП неметаллические включения вытесняются на боковую поверхность слитка и в дальнейшем полностью удаляются токарной обработкой его поверхностного слоя.

В процессе ЭЛП в расплавленном состоянии находится верхняя часть металла, которая в ходе плавки перемещается по высоте переплавляемой заготовки. В результате при ЭЛП происходит перераспределение металлических примесей на границе твердый металл–расплав, что характерно для зонной очистки. Совмещение процессов вакуумной дистилляции и зонной очистки позволяет интенсифицировать рафинирование. Необходимо отметить, что данный процесс достаточно дорогостоящий, поскольку в пар переходит до 4% драгоценных металлов.

На ПП «Приднепровский завод цветных металлов» для полного рафинирования исходного лома

платиновых металлов применяют комбинированную технологическую схему:

- гидрометаллургический аффинаж;
- окислительную индукционную плавку;
- ЭЛП.

Гидрометаллургический аффинаж используют для очистки и разделения платиновых металлов. Окислительные индукционные плавки проводят в печи ИЛТ-0,02 в периклазовом тигле. При этом примеси в оксидной форме, присутствующие в исходном сырье, взаимодействуют с материалом тигля — периклазом, образуя сложные оксидные соединения на основе MgO-шпинели, находящиеся в твердо-жидком состоянии при значениях температуры процесса до 2000 °С. Рафинирующего эффекта индукционной плавки в керамическом тигле достигают вследствие ассимиляции оксидных включений стенками тигля. Результаты очистки лома стеклоплавильных аппаратов после окислительной индукционной плавки приведены в табл. 1.

Анализ результатов табл. 1 показывает, что данный способ позволяет существенно снизить содержание в металле алюминия, кремния, кальция, бора, в сравнении с исходным. Однако незначительное количество ряда металлических примесей переходит в расплав из компонентов стекла (алюминий, кальций, железо, кремний). Кроме того, в металле присутствуют частицы периклаза. Поэтому на следующей стадии переработки используют ЭЛП в печи УЭ-178.

Электронно-лучевая установка УЭ-178М оборудована плосколучевой пушкой П-103 конструкции ИЭС им. Е. О. Патона, расположенной над кристаллизатором и расплавляемой заготовкой. Пушка имеет программируемую развертку луча. Заготовку подают в зону плавки с помощью механизма боковой подачи по направляющему желобу. Плавку осуществляют непосредственно в кристаллизатор в капельном режиме при остаточном давлении в рабочей камере  $5 \times 10^{-2}$  Па [1]. Определены оптимальные



Таблица 2. Распределение родия в объеме платинородиевого слитка

№ слитка	Точки отбора проб	Массовая доля родия в сплаве, %
П-311-4	1	9,81
	2	9,75
	3	9,75
П-323-16	1	10,03
	2	10,10
	3	10,07
П-294-7	1	9,92
	2	9,89
	3	9,87

режимы плавки, при которых достигают необходимого уровня рафинирования и имеют минимальные потери платиновых металлов, являющихся основой сплава.

Важным положительным моментом при ЭЛП является сохранение в значительной степени содержания родия в сплаве и достаточно однородное распределение его в слитке (табл. 2). Для изучения характера распределения родия в объеме слитка его разрезали пополам и отбирали пробу стружки с разных участков: цилиндрической поверхности (точка 1), середины (точка 2) и половины радиуса слитка (точка 3). Содержание родия в точках отбора проб приведено в табл. 2.

Распределение родия в слитках после ЭЛП достаточно равномерное.

Основное внимание при исследовании было сосредоточено на определении оптимальных режимов электронно-лучевого рафинирования сплава Pt–Rh от палладия, присутствующего в ломе стеклоплавильных аппаратов (табл. 3).

Коэффициент рафинирования в приведенных опытных плавках изменялся от 3,4 до 27,3, опти-

мальный ток луча при рафинировании сплава Pt–Rh от палладия равнялся 1,7 А. При таком токе луча удельная мощность нагрева составила 0,54 кВт/см<sup>2</sup>. Анализ влияния скорости плавки на степень рафинирования проведен при условии подвода одной и той же мощности нагрева, т. е. при токе электронного луча 1,7 А. В случае снижения скорости плавки увеличивается продолжительность выдержки металла в жидком состоянии и испарения металлов и, следовательно, повышается степень рафинирования (табл. 3).

При уменьшении скорости плавки ниже 4,5 кг/ч сокращается общий процент выхода Me в слиток, поскольку основные компоненты (платина и родий), испаряясь, частично переходят в конденсат.

Для глубокой очистки целесообразно проводить двукратное рафинирование. С увеличением количества переплавов степень рафинирования повышается интенсивнее, чем показатели скорости переплава и выхода годного сплава.

Палладий и другие легкоплавкие металлы удаляются существенно ниже уровня, установленного ГУ 48-1-169–83. Содержание в сплаве иридия практически не изменяется и в процессе многократного использования накапливается. При необходимости разделения платиновых металлов используют гидрометаллургический аффинаж. Плохо удаляется железо, что объясняется наличием довольно сильной химической связи в системе Fe–Pt. Энергия Гиббса при атомной доле железа в системе Fe–Pt от 0,1 и выше составляет около 73,6 Дж/моль [4].

Экспериментальные плавки по рафинированию платины и платинородиевого сплава от железа с содержанием железа от 0,1 до 1,5 % показали неэффективность использования ЭЛП. Поэтому на ГП «Приднепровский завод цветных металлов» разработан двухстадийный способ пирометаллургическо-

Таблица 3. Технологические параметры рафинирования сплава Pt–Rh от палладия при различных режимах ЭЛП

Массовая доля палладия, %		Коэффициент рафинирования	Скорость плавки, кг/ч	Ток луча, А	Выход в слиток при ЭЛП, %
В исходном сырье	После ЭЛП				
0,99	0,160	6,2	6,8	1,7	97,70
0,92	0,100	9,2	5,2	1,7	96,40
0,24	0,035	6,9	6,0	1,7	97,10
0,24	0,060	4,0	6,7	1,7	99,20
0,84	0,110	7,6	6,9	1,9	98,30
0,69	0,200	3,4	7,3	1,8	99,50
0,92	0,170	5,4	5,6	1,6	99,00
1,16	0,060	19,3	4,2	1,8	95,30
1,04	0,120	8,6	4,2	1,7	97,71
3,00	0,180	16,6*	3,1	1,7	96,80
2,92	0,120	24,3*	2,8	1,7	96,60
3,00	0,110	27,3*	2,6	1,7	96,20
3,00	0,150	20,0*	2,9	1,7	96,70
3,00	0,140	21,4*	2,9	1,7	96,80

\* Двойной ЭЛП.



**Таблица 4. Химический состав платиnorodиевого сплава после индукционной плавки в атмосфере хлора в периклазовом тигле и последующей ЭЛП**

Наименование продукта	Массовая доля элементов, %														
	Pt	Rh	Pd	Ir	Fe	Cu	Ni	Pb	Al	Mg	Si	Sn	Zn	B	Ca
Исходный лом платиnorodиевого сплава	92,07	6,47	0,050	0,0012	1,250	0,060	0,007	0,015	0,040	0,008	0,060	0,009	0,005	0,070	0,01
Слиток платиnorodиевого сплава после индукционного переплава с подачей хлора в реакционную зону	92,89	6,85	0,082	0,0014	0,012	0,077	0,002	0,009	0,005	0,030	0,007	0,002	0,008	0,001	0,004
Слиток платиnorodиевого сплава после ЭЛП	92,95	6,99	0,012	0,0015	0,010	0,004	0,0005	0,0005	0,001	0,004	0,001	0,0005	0,0005	0,0004	0,0005
ТУ 48-1-169-83	93±0,3	7±0,3	Σ 0,15		0,025	Σ 0,025		0,005	0,005	0,005	0,005		Σ 0,02	Не регламентируется	

го рафинирования такого сырья, предусматривающий на первой стадии индукционную плавку платиновых металлов с подачей хлора в реакционную зону, а на второй — ЭЛП [5]. Результаты двухстадийного переплава лома фильерного питателя, использованного для производства базальтового волокна, приведены в табл. 4.

Этим же способом рафинируется конденсат ЭЛП до достаточной чистоты и возвращается в производство стеклоплавильных аппаратов. Анализ результатов ЭЛП (табл. 1–4) показал, что металл соответствует требованиям ТУ 48-1-169-83. Потери благородных металлов при переплаве лома стеклоплавильных аппаратов составляют менее 0,5 мас. %.

В результате проведения опытных плавки получены слитки сплава Pt–Rh, из которых изготовлены стеклоплавильные аппараты (СПА). При среднем ресурсе работы таких СПА, равном 160... 180 сут, аппараты, изготовленные из опытных слитков сплава Pt–Rh на ГП «ПЗЦМ», отработали более 300 сут.

На ГП «ПЗЦМ» освоено производство слитков благородных металлов и сплавов на их основе, химической посуды, термоэлектрических преобразователей и других изделий из платиновых металлов.

1. *Электронно-лучевое* рафинирование платины и сплавов на ее основе. Сообщение 1. Электронно-лучевое рафинирование платины / В. А. Савенко, Н. И. Гречанюк, О. В. Чураков // Современ. электрометаллургия. — 2008. — № 1. — С. 16–18.
2. *О применении* индукционного переплава в секционном кристаллизаторе для утилизации отходов платиновых сплавов / И. В. Шейко, Н. И. Тимофеев, В. А. Дмитриев и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1990. — № 2. — С. 96–99.
3. *Исследование* возможности применения новых методов плавки для получения сплавов платиновых металлов. Отчет о НИР (промежуточный). — М.: Гиредмет, 1985. — 69 с.
4. *Туркдоган Е. Н.* Физическая химия высокотемпературных процессов. — М.: Металлургия, 1988. — 341 с.
5. *Пат. 75300 Украина, МПК С 22 В 11.* Способ рафинирования платины и платиновых сплавов / В. А. Кадочников, В. А. Савенко, А. В. Майор, О. М. Зеленский. — Оpubл. 15.03.2006, Бюл. № 3.

НПП «ГЕКОНТ», Винница

Поступила 08.11.2007



УДК 669.187.58

## ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ БАРАБАНА-ХОЛОДИЛЬНИКА ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ УСТАНОВКИ В ПРОЦЕССЕ СВЕРХБЫСТРОЙ ЗАКАЛКИ РАСПЛАВА

В. А. Шаповалов, Ю. А. Никитенко, А. С. Мельник

Предложена математическая модель теплового состояния барабана-холодильника. Изучено влияние его геометрических размеров на скорость закалки ленты с аморфной структурой.

Mathematical model of thermal state of a drum-cooler is suggested. Effect of its geometric parameters on the rate of hardening of a strip of amorphous structure was studied.

**Ключевые слова:** спиннингование; сверхбыстрая закалка; барабан-холодильник; математическая модель; граничные условия

В настоящее время способы получения сплавов с аморфной структурой и микрокристаллических с применением сверхбыстрой закалки выделяются в отдельное направление в металлургическом производстве [1]. Быстрозакаленные сплавы, особенно изготавливаемые способом спиннингования в виде лент, находят все большее применение в различных областях производства. Наибольшее распространение ленты с аморфной структурой получили в области пайки, электроники, химии [2].

Однако ряд технологических и теоретических вопросов производства таких материалов не решен, что обуславливается скоротечностью процесса, слабым управлением разливкой и затвердеванием расплава, а также сложностями, связанными со значительной зависимостью их склонности к аморфизации от химического состава. Моделированию данного технологического процесса посвящено большое количество научных работ, однако основная их часть описывает процессы затвердевания расплава и формирования аморфной структуры, а исследованиям работы барабана-холодильника внимание практически не уделено. Поэтому предварительно следует изучить тепловое состояние барабана-холодильника, что позволит оценить объем металла, который можно аморфизировать на существующем оборудовании и использовать эти данные при проектировании нового. Все исследования проводились на плазменно-дуговой установке для получения

сплавов с аморфной и микрокристаллической структурой способом спиннингования, созданной в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАНУ [2].

**Постановка задачи.** При сверхбыстрой закалке тонкой металлической ленты (50...100 мкм) основное охлаждение расплава осуществляется в результате контактного теплообмена с барабаном-холодильником. Поэтому такой параметр, как градиент температуры в теле барабана, играет определяющую роль в процессе аморфизации. Барабан-холодильник

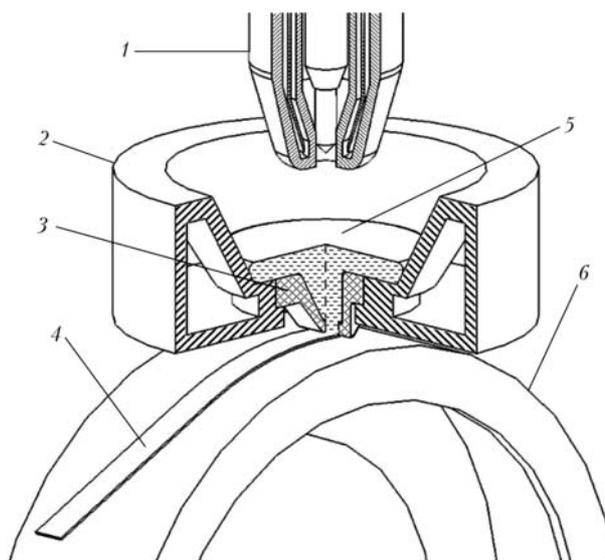


Рис. 1. Схема плавильной емкости и барабана-холодильника: 1 – плазмотрон; 2 – водоохлаждаемый тигель; 3 – сливное сопло; 4 – лента; 5 – расплав; 6 – барабан-холодильник

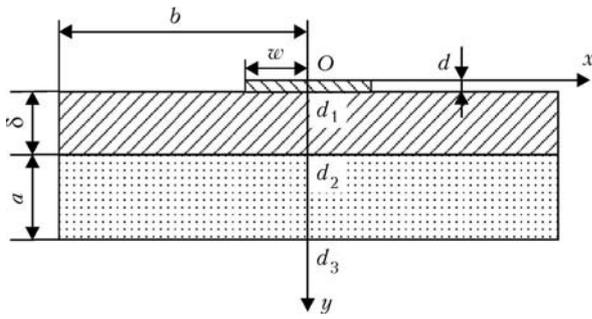


Рис. 2. Схема расчетного сечения

имеет форму полого цилиндра, внутрь которого в качестве хладагента заливается вода. На рис. 1 представлена схема плавильной емкости с керамическим сливным соплом, барабаном-холодильником и затвердевающей на нем лентой.

Цель данной работы заключалась в моделировании теплового состояния барабана-холодильника в процессе охлаждения расплава в виде ленты и изучении влияния его геометрических размеров на скорость закалки ленты с аморфной структурой.

**Расчетная схема.** Построим математическую модель нагрева тела барабана-холодильника в процессе охлаждения ленты толщиной  $d$  на поверхности вращающегося цилиндрического барабана, толщина контактной стенки которого  $\delta = \frac{D_1 - D_2}{2}$ , где  $D_1, D_2$  — соответственно внешний и внутренний диаметры;  $2b$  — ширина барабана. Начало отсчета пространственной координаты находится на внешней поверхности ленты, ось  $y$  направлена к центру барабана, а ось  $x$  — вдоль образующей цилиндра. Рассмотрим конструкцию барабана, у которого толщина стенки  $\delta$ , контактирующей с расплавом, меньше ширины барабана  $2b$ , а ширина  $2b$  меньше диаметра барабана  $D_1$ . Представляет интерес исследовать процесс распределения тепла по ширине и высоте стенки с учетом высокой скорости вращения барабана (с периодом  $n = 0,04$  с), распределением тепла вдоль ленты можно пренебречь. В этом случае тепловое состояние стенки барабана описывается двумерной моделью теплопроводности. Схематически сечение барабана и ленты дано на рис. 2.

Влияние кривизны стенки на кривую изменения температуры внутри нее можно описать коэффициентом кривизны  $\phi$  [3]. Его значение определяется отношением диаметров  $\phi = f(D_1/D_2)$  (рис. 3). Поэтому если толщина стенки цилиндра, по сравнению с диаметром, мала и отношение  $D_1/D_2$  близко к единице, влиянием кривизны стенки можно также пренебречь. В нашем случае отношение диаметров составляет 1,056, что делает  $\phi = 1$ . Поэтому данную задачу можно описать элементарным двумерным уравнением в прямоугольных декартовых координатах.

При расчете исследуемое сечение последовательно проходит по всей длине окружности барабана-

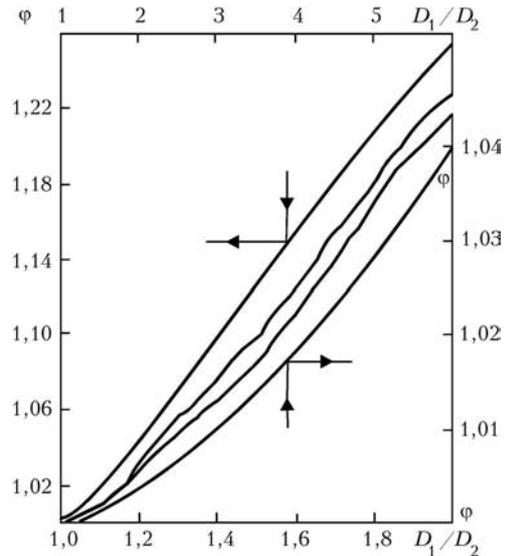


Рис. 3. Зависимость коэффициента кривизны  $\phi = f(D_1/D_2)$  [3]

холодильника, к концу периода приходит в исходную точку, и процесс повторяется. В каждом новом периоде распределение температуры в начальном положении расчетного сечения равно конечному распределению температуры в последней точке предыдущего периода.

Пренебрегая конвективным перемешиванием воды и считая жидкую среду неподвижной относительно барабана, распределение тепла по сечению опишем следующим двумерным уравнением теплопроводности:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right),$$

где  $T(x, y)$  — температура в точке  $(x, y)$ ;  $\lambda(x, y, T)$  — коэффициент теплопроводности в точке  $(x, y)$  при температуре  $T$ ;  $c_p$  — теплоемкость;  $\rho$  — плотность вещества.

Расчетная область для ленты следующая:  $0 \leq x \leq w$ ;  $0 \leq y \leq d_1$ ; для барабана:  $0 \leq x \leq b$ ;  $d_1 \leq y \leq d_2$ ; для воды:  $0 \leq x \leq b$ ;  $d_2 \leq y \leq d_3$ .

Поскольку рассматриваем задачу, симметричную относительно оси  $Oy$ , область рассмотрения ограничиваем прямоугольником  $0 \leq x \leq b$ ,  $d_1 \leq y \leq d_3$ .

Сформулируем такие граничные условия: тепловой поток в плоскости симметрии отсутствует

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0;$$

плоскость  $x = w$

$$-\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=w, y \leq d_1} = \alpha_{sa} (T(W, y, t) - T_{air}) - q_{rad};$$

плоскость  $y = 0$

$$\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{0 \leq x \leq w, y=0} = \alpha_{sa} (T(x, 0, t) - T_{air}) - q_{rad};$$

плоскость  $y = d_1$



$$\begin{cases} \lambda_s(x, y, T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{0 \leq x \leq w, y=d_1} & = \alpha_{sc}(T(x, d_1 + 0, t) - T(x, d_1 - 0, t)) \text{ при } T_S \geq T_{fin}; \\ \lambda_c(x, y, T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{0 \leq x \leq w, y=d_1} & = \alpha_{ca}(T(x, d_1 + 0, t) - T_{air}) \text{ при } T_S \leq T_{fin}; \\ \lambda_c(x, y, T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{0 \leq x \leq b, y=d_1} & = \alpha_{ca}(T(x, d_1 + 0, t) - T_{air}); \end{cases}$$

плоскость  $x = b$

$$\begin{aligned} -\lambda_c(x, y, T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b, d_1 \leq y \leq d_2} &= \alpha_{sa}(T(b, y, t) - T_{air}); \\ -\lambda_c(x, y, T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b, d_2 \leq y \leq d_3} &= \alpha_{wa}(T(b, y, t) - T_{air}); \end{aligned}$$

плоскость  $y = d_2$

$$\lambda_c(x, y, T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{0 \leq x \leq b, y=d_2} = \alpha_{cw}(T(x, d_2 + 0, t) - T(x, d_2 - 0, t));$$

плоскость  $y = d_3$

$$-\lambda_{cw}(x, y, T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{0 \leq x \leq b, y=d_3} = \alpha_{wa}(T(x, d_3 + 0, t) - T_{air}),$$

где  $\alpha_{sa}, \alpha_{sc}, \alpha_{ca}, \alpha_{cw}, \alpha_{wa}$  — коэффициенты теплопередачи соответственно ленты-воздуха, ленты-барабана, барабана-воздуха, барабана-воды, воды-воздуха;  $\lambda_s, \lambda_c, \lambda_w$  — коэффициенты теплопроводности соответственно ленты, барабана, воды.

Процесс передачи тепла между поверхностями теплообмена и окружающей средой описывается законом Ньютона-Рихмана [4]. На границе лента-воздух к конвективному теплообмену добавляется лучистый, который подчиняется закону Стефана-Больцмана и описывается граничным условием второго рода.

$$q_{rad} = \epsilon \sigma \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \text{тепловой поток, обусловленный излучением, где } \epsilon - \text{степень черноты; } \sigma - \text{постоянная Стефана-Больцмана.}$$

Существенную роль излучение играет лишь на границе лента-воздух, поскольку только при высоких температурах лучистая составляющая сопоставима с конвективной. Например, для ленты из никелевого сплава при температуре 1000 °С конвективная составляющая теплового потока достигает  $7 \cdot 10^4$ , лучистая — около  $1 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> ( $\epsilon(T)$  выбрали, как для чистого никеля [5]). В то же время конвективная составляющая теплоотдачи с внутренней стенки медного барабана равнялась  $7 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup> (при проведении эксперимента барабан не нагревался выше 100 °С), а лучистая составляющая имела всего около  $0,5 \cdot 10^2$  Вт/м<sup>2</sup> (для оценки взято  $\epsilon \approx 0,1$  [5]). Таким образом, на всех границах, кроме лента-воздух, излучением можно пренебречь.

Для решения двумерного уравнения теплопроводности выбрана схема Кранка-Никольсон [6, 7]. Вычисления производили с использованием пакета MATLAB 7.

Для сравнения результатов моделирования и практических данных выбран процесс закатки сплава системы Ni-Si-B на медном барабане. Согласно результатам рентгеноструктурного анализа, при экспериментах лента получена в аморфном состоянии. Высокотемпературный дифференциальный анализ показал, что первые эндотермические реакции при нагреве ленты с аморфной структурой появляются при 400 °С (673 К) [8]. Таким образом, можно сделать вывод, что температура ленты при отделении от барабана составляет  $\leq 400$  °С (673 К). Технологические параметры и физические данные материалов для расчета следующие [5]:

Толщина ленты $d$ , м	.....	$1 \cdot 10^{-4}$
Толщина стенки барабана $\delta$ , м	.....	$8 \cdot 10^{-3}$
Ширина ленты $2w$ , м	.....	$1,6 \cdot 10^{-2}$
Ширина барабана $2b$ , м	.....	$8 \cdot 10^{-2}$
Толщина слоя воды $a$ , м	.....	$1 \cdot 10^{-2}$
Внешний диаметр барабана $D_1$ , м	.....	0,3
Внутренний диаметр барабана $D_2$ , м	.....	0,284
Период вращения барабана $n$ , с	.....	0,04
Температура воздуха $T_{air}$ , °С	.....	14
Начальная температура барабана $T = T_{waters}$ , °С	.....	14
Начальная температура ленты $T_0$ , °С	.....	1050
Температура ленты в момент отрыва от барабана $T_{fin}$ , °С	.....	400
Начальная температура воды $T_{waters}$ , °С	.....	14
Коэффициенты теплообмена, Вт/(м <sup>2</sup> ·К):		
ленты-воздуха $\alpha_{sa}$		70
ленты-барабана $\alpha_{sc}$		$5 \cdot 10^6$
барабана-воды $\alpha_{cw}$		$8 \cdot 10^4$
барабана-воздуха $\alpha_{ca}$		70
воды-воздуха $\alpha_{wa}$		10
Коэффициенты теплопроводности, Вт/(м·К):		
ленты $\lambda_s$		93
барабана $\lambda_c$		389
воды $\lambda_w$		0,6

**Обсуждение результатов.** В результате моделирования получено распределение температур в расчетном сечении (рис. 4). Как и следовало ожидать, наибольший градиент температуры находится непосредственно под местом контакта барабана с лентой, также значительную роль в распределении температуры играет и направление по ширине сечения. Вода при данной схеме практически не оказывает существенного влияния на распределение температуры. Таким образом, основное поглощение выделившейся теплоты от расплава осуществляется телом барабана-холодильника.

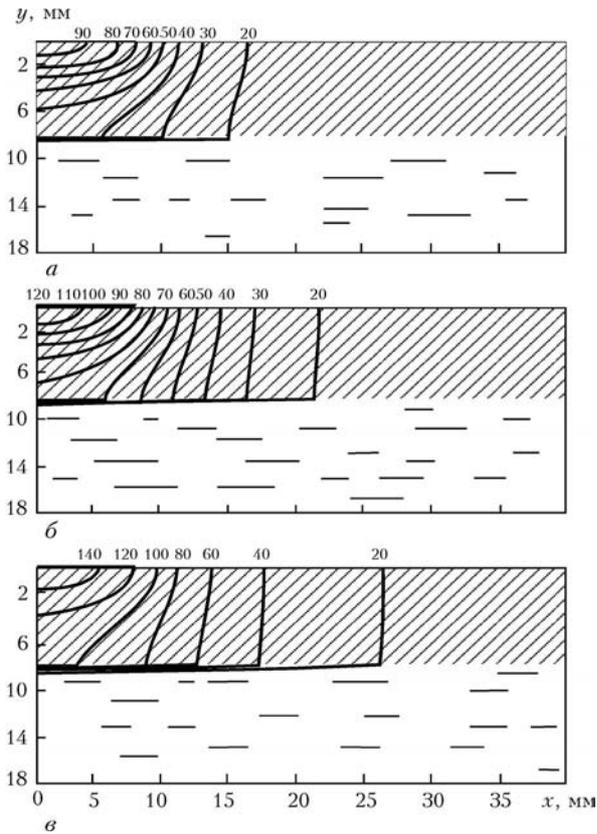


Рис. 4. Изотермы расчетного сечения при  $t$ , с: а – 1; б – 2; в – 3

Полученные результаты моделирования оценивали по скорости закалки ленты, равной  $\frac{T_0 - T_{fin}}{t_k}$ , где  $t_k$  – длительность контакта и охлаждения ленты на поверхности барабана. Исследования диапазона значений коэффициентов теплообмена показали, что в начальный период закалки изменение коэффициента теплообмена между расплавом и барабаном в пределах  $5 \cdot 10^2 \dots 5 \cdot 10^6$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) приводит к изменению скорости закалки  $(1,0 \dots 6,5) \cdot 10^5$  К/с. Изменение коэффициента теплообмена между ба-

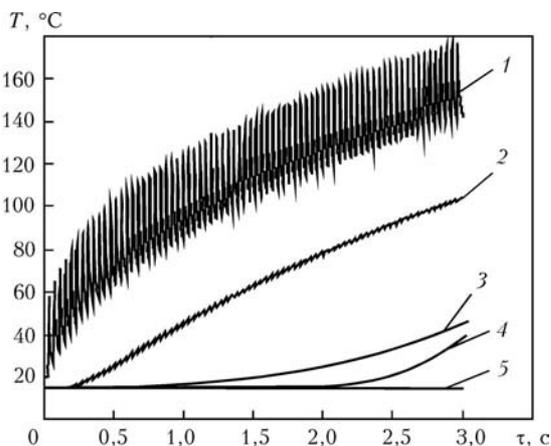


Рис. 5. Изменение температуры барабана в процессе закалки расплава: 1 – на внешней поверхности барабана  $d_1$ ; 2 – на внутренней поверхности  $d_2$ ; 3 – воды на расстоянии 0,4 мм от точки  $d_2$ ; 4 – зависимость, полученная экспериментально; 5 – температура воды на границе с воздухом  $d_3$

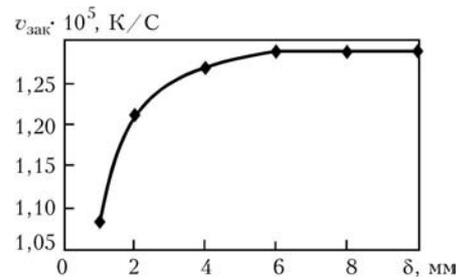


Рис. 6. Зависимость скорости закалки  $v_{зак}$  (вторая секунда) от толщины контактной стенки барабана

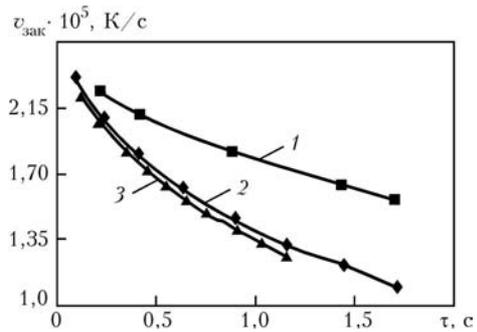


Рис. 7. Изменение скорости закалки расплава при разных диаметрах барабана-холодильника, см: 1 – 100; 2 – 30; 3 – 15

рабаном и водой в диапазоне  $8 \cdot 10^2 \dots 8 \cdot 10^8$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) показало его незначительное влияние на скорость закалки, что связано с неподвижностью жидкой среды относительно барабана.

Временные зависимости температуры в контрольных точках зафиксировали согласование полученных результатов с экспериментальными данными (рис. 5). Проведенные натурные эксперименты по измерению температуры внутри вращающегося барабана холодильника непосредственно под местом контакта с расплавом продемонстрировали, что за время слива (около 2,8 с) температура изменилась от 14 (287 К) до 39 (312 К) °С [9]. Принимая во внимание конструктивные особенности измерительного датчика, полученная кривая соответствует температуре воды на расстоянии 0,3... 0,5 мм от точки  $d_2$ . Поскольку исследования проводили на небольших объемах металла, процесс слива был скоротечен, за это время температура барабана постоянно возрастала, т. е. процесс характеризовался как переходной. Расчет зависимости температуры барабана-холодильника показал хорошее согласование с экспериментальной кривой, имеющей тот же угол наклона зависимости изменения температуры от времени. Некоторое различие объясняется инерционностью измерений и упрощенной математической моделью.

Для определения критерия оптимизации конструкции барабана проведено моделирование с изменением геометрических размеров барабана-холодильника. Исследование влияния толщины контактной стенки барабана (вторая секунда слива) на скорость закалки (рис. 6) показало, что утонение стенки приводит к падению последней, а увеличение



толщины более 6... 10 мм не способствует ее качественным изменениям и останавливается на значении  $1,3 \cdot 10^5$  К/с.

Изучение влияния диаметра барабана-холодильника на скорость закалки расплава во времени (рис. 7) показало падающую характеристику. С повышением диаметра угол наклона уменьшается.

При моделировании более длительного процесса закалки температура барабана асимптотически приближается к некоторой постоянной температуре, зависящей от физических свойств материалов. Это связано с тем, что теплоотвод фактически осуществляется только за счет конвективного теплообмена с окружающей средой посредством обдува барабана воздухом, что не соизмеримо с количеством подводимой теплоты от расплава. Сравнить, однако, полученные зависимости с экспериментом не представляется возможным. Для получения лент большей длины (на промышленном оборудовании) необходимо обеспечить качественный теплоотвод, постоянную циркуляцию хладагента и увеличение диаметра барабана-холодильника.

#### Выводы

1. Разработана математическая модель теплового состояния барабана-холодильника в процессе сверхбыстрой закалки расплава способом спиннингования.

2. В результате моделирования установлено влияние на скорость закалки ленты коэффициентов теплообмена между поверхностями лента-барабан,

барабан-вода, внешнего диаметра и толщины контактной стенки барабана.

3. Показано, что в целях оптимизации конструкции барабана его внешний диаметр должен быть максимально возможным, а толщина контактной стенки превышать 10 мм.

1. *Моделирование* процесса получения аморфной металлической ленты на основе уравнений гидродинамики и теплопроводности / Ю. А. Аникин, Ю. Б. Левин, О. А. Абдул-Фаттах и др. // Изв. вузов. Черн. металлургия. — 2004. — № 11. — С. 57–60.
2. *Получение* аморфных и нанокристаллических материалов с применением плазменно-дугового нагрева (Обзор) / М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, Г. Ф. Торхов и др. // Современ. электроталлургия. — 2003. — № 4. — С. 29–35.
3. *Михеев М. А., Михеева И. М.* Основы теплопередачи. Изд. 2-е. — М.: Энергия, 1977. — 344 с.
4. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности. — М.: Высш. шк., 1966. — 598 с.
5. *Таблицы физических величин.* Справочник / Под ред. акад. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976. — 1008 с.
6. *Петров И. Б., Лобанов А. И.* Лекции по вычислительной математике: Учеб. пособие. — М.: Интернет-университет информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. — 523 с.
7. *Яценко Н. Н.* Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. — Новосибирск: Наука, 1967. — 196 с.
8. *Никитенко Ю. О.* Швидко загартований метал, отриманий при плазмово-дуговій плавці і спінінгуванні та його структура // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. — 2006. — 4, № 4. — С. 797–801.
9. *Измерение* температуры барабана-холодильника в процессе сверхбыстрой закалки металла, расплавляемого в плазменной печи / В. А. Шаповалов, Ю. А. Никитенко, В. Р. Бурнашев, Г. Ф. Торхов // Современ. электроталлургия. — 2007. — № 4. — С. 27–29.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 13.05.2008



## РАЗРАБОТКА И ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАСКИСЛЕНИЯ И ЛЕГИРОВАНИЯ ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ ШХ15СГ-В ФЕРРОСИЛИКОМАРГАНЦЕМ МнС25\*

**А. И. Панченко, И. Н. Логозинский, А. С. Сальников,  
С. Л. Мазурук, С. А. Касьян, С. С. Казаков,  
Л. М. Скрипка, М. И. Гасик, А. П. Горобец, О. Н. Сезоненко**

Изложены результаты опытно-промышленного освоения выплавки подшипниковой стали ШХ15СГ-В путем применения ферросиликомарганца МнС25 (ДСТУ 3548–97) с массовой долей кальция не более 0,1 % вместо ферромарганца ФМн78А (ДСТУ 3547–97) и ферросилиция ФС65 (ДСТУ 4127-2002) с высоким (до 0,5 %) и нестабильным содержанием кальция. Использование отечественных ферросплавов взамен импортного ферросилиция, согласно разработанной инновационной технологии выплавки и внепечной обработке стали и обеспечивает существенное повышение выхода годного, способствует снижению загрязненности заготовок и сортового проката глобулярными и оксидными включениями.

Results of experimental-industrial mastering of melting bearing steel ShKh15SG-V by application of ferro-silico-manganese MnS25 (DSTU 3548–97) with a mass share of calcium of not more than 0.1% are described. Ferromanganese FMn78A (DSTU 3547–97) and ferrosilicium FS65 (DSTU 4127-2002) with a high (up to 0.5%) and instable content of calcium are described. The use of national ferroalloys instead of imported ferrosilicium using developed innovation technology of melting and ladle steel treatment guarantees the great increase in yield of the efficient metal and promotes the decrease in contamination of billets and section rolled metal with globular and oxide inclusions.

**Ключевые слова:** подшипниковая сталь ШХ15СГ-В; дуговая основная электропечь; технология выплавки стали; легирование и раскисление стали ферросиликомарганцем; внепечная обработка; твердые шлакообразующие материалы; ковша-печь, ковшовый вакууматор, качество заготовки и сортового проката; глобулярные, оксидные включения; экономия ферросплавов

**Постановка задачи.** Одним из направлений маркетинговой стратегии ОАО «Днепроспецсталь» является наращивание производства подшипниковой стали для ОАО «Харьковский подшипниковый завод» (ХарП). Последний планирует организовать поставки продукции для ряда ведущих автомобильных концернов («Тойота», «Ниссан», «Фольксваген»), открывающих свои филиалы в России, и освоить производство крупногабаритных подшипников повышенной точности для подвижного состава МПС стран СНГ.

Производство стали для крупногабаритных подшипников с повышенной прокаливаемостью, обеспечиваемой в стали ШХ15СГ (ГОСТ 3756–73) массовой долей марганца 0,90...1,20, кремния 0,40...0,65 %, в стали ШХ15 — соответственно 0,20...0,40 и 0,17...0,37 % является более сложным, чем других видов подшипниковых сталей, в аспекте технико-экономических показателей сквозной технологии выплавки и внепечной обработки металла.

В статье [1] изложены и проанализированы результаты технологии выплавки и внепечной обработки стали ШХ15СГ-В с применением, вместо отечественного ферросилиция ФС65 (ДСТУ 4127-2002) содержащего 0,3...0,5 % Са [2, 3], импортного 75%-го ферросилиция (Са ≤ 0,1 %). Установлено, что использование для опытной кампании импортного ферросилиция и ферромарганца марки ФМн78А (ДСТУ 3547–97) с внепечной обработкой металла,

\*Работа выполнена под общим и научным руководством академика НАНУ М. И. Гасика.

согласно действующей на ОАО «Днепроспецсталь» сквозной технологии производства стали ШХ15СГ-В, не позволило повысить качество стали со стабильно низкими баллами по глобулярным и оксидным включениям. При оценке качества металла (ГОСТ 801–78 и ASTM E45, метод А) относительно глобулярных видов включений установлено, что некоторое снижение загрязненности заготовок и сортового проката сопровождалось повышением баллов по оксидным включениям. Таким образом, предполагаемого существенного повышения выхода годного сортового проката сопоставимой геометрической размерности не достигли [1].

Особо следует отметить, что постоянно возрастающие требования потребителей подшипникового металла к качеству металлопродукции обуславливают необходимость продолжения научных поисков и разработки новых технологий для повышения степени чистоты стали от неметаллических включений. Многочисленными исследованиями [2, 3] микро- и макроструктуры подшипниковой стали и стендовыми испытаниями качества металла установлено опасное влияние неметаллических включений на эксплуатационные характеристики подшипников. Возникающее в зоне контакта тел качения с кольцами подшипника объемно-напряженное состояние металла, приводящее к изменению металлофизических свойств вплоть до структурных изменений стали в зоне контакта в системе пары шар (ролик)–кольцо, вызывает некогерентность упругоэластических свойств межфазной границы включения–металлическая матрица с последующим развитием питтинга (выкрашивания металла).

В работе [4] представлена взаимосвязь индекса опасности и размеров различных химико-минералогических включений (рис. 1). Наибольшую опасность в аспекте снижения долговечности эксплуатации подшипников вызывают крупноразмерные, труднодеформируемые в ходе прокатки металла, включения, сохраняющие в готовой металлопродукции форму глобулей. Неметаллические включения представляют собой гомогенные по структуре алюминаты кальция, гетерофазные комплексы, включающие соединения (растворы) системы  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$  и шпинелидные фазы  $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})\text{O}(\text{Al}, \text{Cr}^{3+}, \text{Fe}^{3+})_2\text{O}_3$ . Как правило, при анализе условий формирования включений устанавливается приоритет абсолютных содержаний растворенного в металле кислорода и

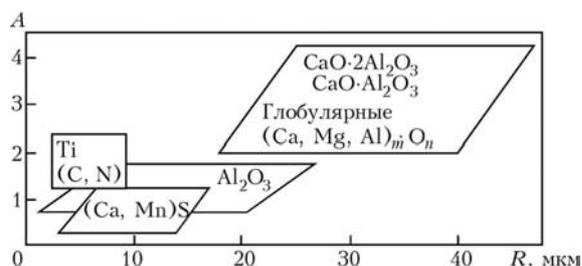


Рис. 1. Влияние химико-минералогической природы и размера включений  $R$  на эксплуатационные характеристики подшипников [4];  $A$  – индекс опасности

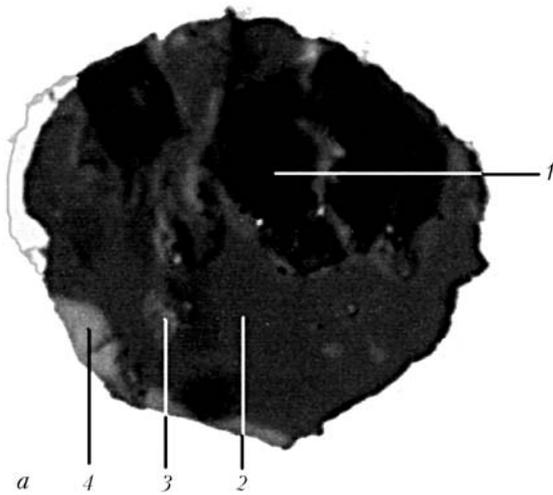
элемента-раскислителя. В то же время особое значение приобретает соотношение активностей как элементов-раскислителей ( $a_{\text{Mn}}$ ,  $a_{\text{Si}}$ ,  $a_{\text{Al}}$ ), так и неконтролируемых стандартами в ходе выплавки и внепечной обработки ( $a_{\text{Mg}}$ ,  $a_{\text{Ca}}$ ) [5–7]. С изменением соотношения активностей раскислителей в ходе раскисления жидкой стали и во время затвердевания металла кристаллизация и твердофазные реакции формирования оксидных фаз происходят в определенных областях фазовых равновесий системы  $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ .

Содержание, химико-минералогический состав и размеры неметаллических включений зависят от ряда следующих приоритетных факторов: термодинамической активности применяемых раскислителей и их состава, температурно-временных режимов раскисления и внепечной обработки металла, способов разлива стали, ограничения вторичного окисления, качества сифонного припаса (высокой огнеупорности и малой эрозии), развеса слитков (продолжительности кристаллизации металла) и геометрической размерности сортового проката, влияющей на деформируемость включений.

**Физико-химический аудит действующей технологии выплавки и рафинирования стали.** Физико-химический аудит процессов выплавки и внепечной обработки стали ШХ15СГ-В, проведенный по действующей технологии с использованием отечественного ферросилиция ФС65 и опытной технологии с применением импортного низкокальциевого 75%-го ферросилиция, позволил выявить недостатки сквозной технологии на стадиях легирования и раскисления жидкой стали и обосновать инновационную сквозную технологию производства стали ШХ15СГ-В в условиях ОАО «Днепроспецсталь» [8, 9].

Теоретический анализ процессов и материальный баланс раскислителей стали (кальция и алюминия) на всех стадиях внепечной обработки показали, что «избыточное» количество кальция при разливе и кристаллизации металла в изложнице (развес слитка 3,6 т) хотя и обеспечивает с остаточным (растворенным) алюминием относительно низкое содержание растворенного («активного») кислорода, но вместе с тем в значительной мере ответственно за формирование увеличенных количества и размеров глобулярных включений в стали как гомогенных на основе  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ , так и гетерогенных на основе  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{SiO}_2$  (рис. 2, табл. 1).

Исследования, проведенные на заводе «Днепроспецсталь» показали, что из-за относительно высокого содержания в ферросилиции ФС65 кальция, концентрация его в жидкой стали после присадки ферросилиция в металл при обработке в ковше-печи повышается до значений, превышающих критическое. Это стало основанием для проведения опытных промышленных плавок стали ШХ15СГ-В по различным вариантам раскисления алюминием и присадки ферросилиция ФС65 в металл (в печь, ковше-печь, вакууматор или присадки по частям от общего



количества на различных стадиях выплавки и внепечного рафинирования жидкого металла). Усредненные значения химического состава металла и шлака по действующей технологии на различных стадиях выплавки и внепечной обработки стали ШХ15СГ-В представлены в табл. 2 и 3.

Поскольку тепловая нагрузка на поверхность шлакового расплава ( $q$  распада электродов на ковше-печи) почти на 50 % выше, в сравнении с дуговой печью эквивалентной емкости ( $q_{\text{ковш}} = 0,4$ ;  $q_{\text{ДСП60}} = 0,22$ ) и занимает практически всю поверхность шлакового расплава, то при перегреве шлака в зоне работы электрических дуг и при более высокой интегральной температуре шлака в установке ковш-печь получают развитие массообменные процессы в системе

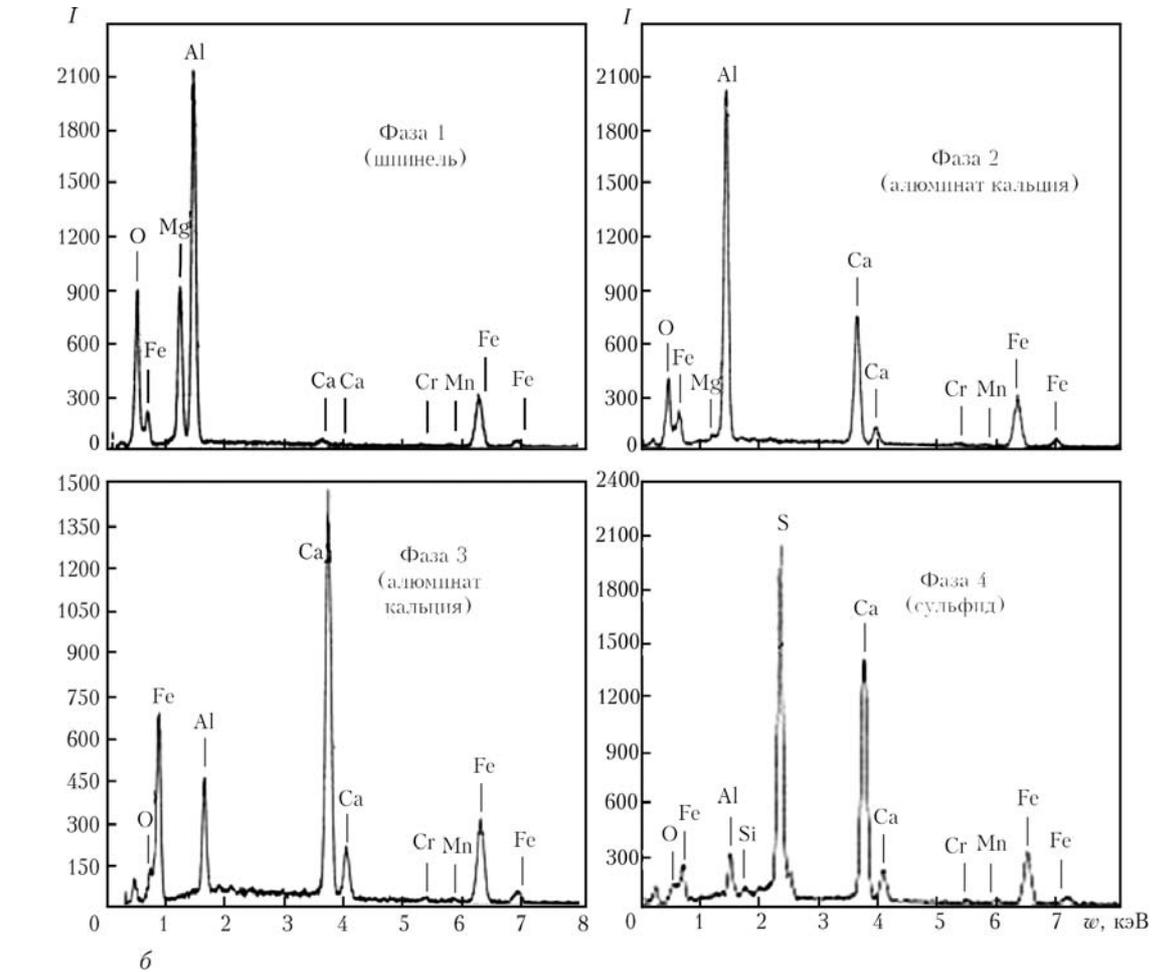


Рис. 2. Глобулярное гетерофазное включение в стали ШХ15СГ-В: а – оптическое изображение,  $\times 1500$ ; б – энергетические спектры элементов в  $K_{\alpha}$ -излучении  $\omega$ : 1 – 4 – анализируемые фазы; I – импульс

Таблица 1. Химический состав анализируемых фаз (рис. 2) [1]

Фаза	Массовая доля элементов, %							
	Mg	Al	Ca	Si	Cr	Mn	Fe	O
1	11,34	24,89	0,52	–	0,26	0,32	25,37	37,29
2	0,33	22,41	18,71	–	0,36	–	23,63	34,56
3	–	5,57	37,62	–	0,78	–	27,76	28,28
4	–	1,76	23,54	0,21	0,32	S	17,28	40,63
						16,26		



**Таблица 2. Химический состав стали ШХ15СГ-В на стадиях выплавки и внепечной обработки в ковше-печи и ковшовом вакууматоре**

Стадия технологии	Массовая доля элементов, %							
	C	Mn	Si	Cr	P	S	Al	Ca, ppm
Перед выпуском из ДСП*	0,75	0,15	0,13	1,200	0,011	0,045	0,004	4,0
В начале обработки в ковше-печи (после присадки ФС65)	0,95	0,17	0,20	0,014	0,018	0,040	0,040	5,0
В конце обработки в ковше-печи	0,99	1,00	0,48	1,430	0,014	0,009	0,045	13,8
В конце обработки в вакууматоре	0,99	1,00	0,48	1,430	0,014	0,005	0,033	10,6

\* Дуговая сталеплавильная печь.

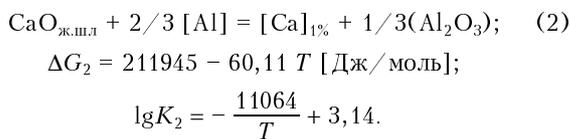
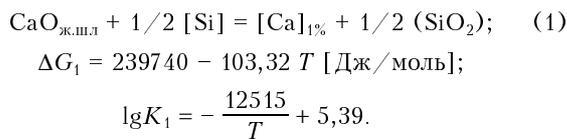
**Таблица 3. Химический состав шлака на различных стадиях технологии производства стали ШХ15СГ-В**

Период выплавки	Массовая доля компонентов, %				
	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	FeO
Перед выпуском из ДСП	45	15	3	7	2,5
В начале обработки в ковше-печи (после присадки ФС65)	50	9	13	8	1,0
В конце обработки в ковше-печи	55	7	9	10	0,3
В конце обработки в вакууматоре	55	7	10	15	0,3

шлак–металл, инициируемые реакциями восстановления с участием компонентов металлической ванны и оксидно-фторидного шлака.

Источником поступления «избыточного» кальция в металл являются процессы восстановления кальция из расплава CaO–CaF<sub>2</sub> кремнием ферросилиция ФС65, алюминием в составе ФС65 (1,5... 2,0 %) и порошком алюминия при раскислении шлака в ходе вакуумирования металла.

Восстановление кальция на стадии внепечной обработки может быть в обобщенном виде представлено следующими реакциями:



Термодинамические характеристики реакций (1) и (2) рассчитаны с учетом теплоты растворения и перехода компонентов из стандартного состояния «чистое вещество» в идеальный бесконечно разбавленный 1%-й раствор в железе [10].

Определяя по методу А. Г. Пономаренко [10] активности компонентов металла и шлака (табл. 3) как фазы с коллективизированным состоянием электронов, установили, что значения активностей оксидов при 1600 °С составляют 0,345 для 50 % CaO; 0,137 для 10 % SiO<sub>2</sub> и 0,048 для 10 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Тогда химический потенциал ( $\mu_i = \frac{\Delta G_{T,i}}{d_{in}}$ ) образования растворов кальция с содержанием 10 ppm по реакциям (1) и (2) при условии равенства химических потенциалов элементов, растворенных в металле и шлаковой фазе, приобретает следующие значения:

T, °С	1600	1700	2000	2200
$\mu_{\text{Ca}}^{(1)}$ , Дж	1,31	1,32	0,17	- 0,55
$\mu_{\text{Ca}}^{(2)}$ , Дж	3,60	3,38	2,73	2,29

Анализ термодинамических данных и теоретические расчеты подтверждают преобладающее влияние кремния на процессы восстановления кальция и обозначают технологические факторы для ограничения этого процесса снижением основности шлака и повышением содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Особо следует отметить, что соблюдение режима получения стали с рациональным содержанием кальция в жидком металле является необходимым, но не достаточным условием производства сортового проката с регламентированными баллами загрязненности металла глобулярными и оксидными включениями по высшим группам качества. Поэтому очень важно создать наиболее благоприятное состояние металла, предшествующее легированию, раскислению и внепечной обработке стального полупродукта в ДСП-60, ковше-печи и вакууматоре для образования первичных в жидкой стали и вторичных неметаллических включений в интервале ликвидус–солидус при кристаллизации металла в изложнице.

Термодинамическим анализом и экспериментальными исследованиями установлено, что при раздельном раскислении жидкого железа марганцем (ферромарганцем) образуются оксиды (Mn, Fe)O

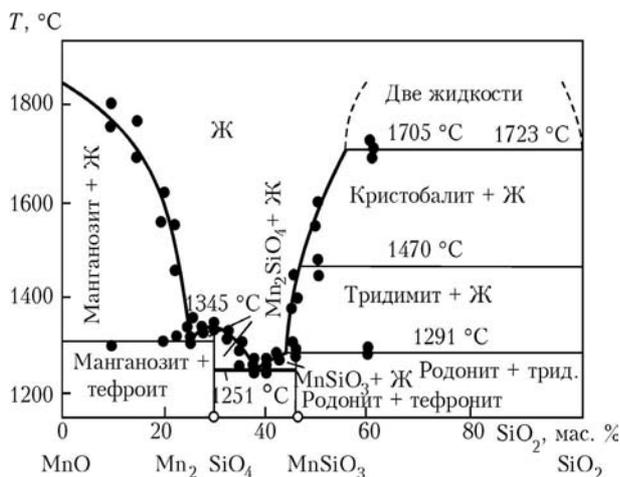


Рис. 3. Диаграмма состояния MnO-SiO<sub>2</sub> [12]

или чистый оксид марганца с температурой плавления 1850 °С. В системе Fe-Mn-O при содержании марганца в расплаве 0,02 % моль. доли (1,9 мас. %) равновесная концентрация оксида марганца в шлаковой фазе достигает 89,8 мас % [11]. В случае раскисления железа кремнием (ферросилицием) продуктом реакции является SiO<sub>2</sub> с температурой плавления 1720 °С. Совмещенное легирование и предварительное раскисление с применением комплексного сплава ферросиликомарганца сопровождается образованием (при определенных массовых долях марганца и кремния в ферросплаве и в жидком железе) легкоплавких продуктов реакции системы MnO-SiO<sub>2</sub> (рис. 3) эвтектического состава с температурой 1320 °С [12]. Это положение термодинамически обосновано и экспериментально подтверждено в монографии [13], а позже в работе [14]. Причем согласно монографии, жидкие неметаллические

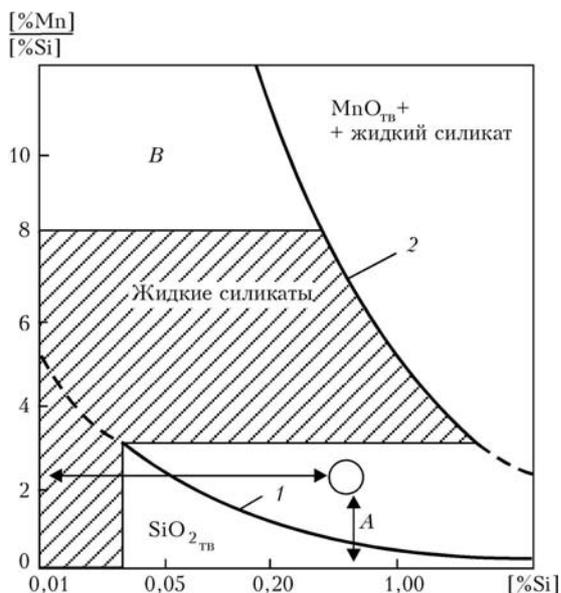


Рис. 4. Области твердых и жидких продуктов раскисления марганцем и кремнием при 1600 °С [13]: 1 — силикаты марганца, насыщенные кремнеземом, отделены от твердого кремнезема; 2 — жидкие силикаты марганца, отделены от твердых растворов на основе оксида марганца; А — продукты реакции раскисления находятся в твердо-жидком состоянии; В — образование частиц твердого оксида марганца; О — состав продуктов реакции раскисления для соотношения [%Mn]/[%Si] в стали ШХ15СГ-В

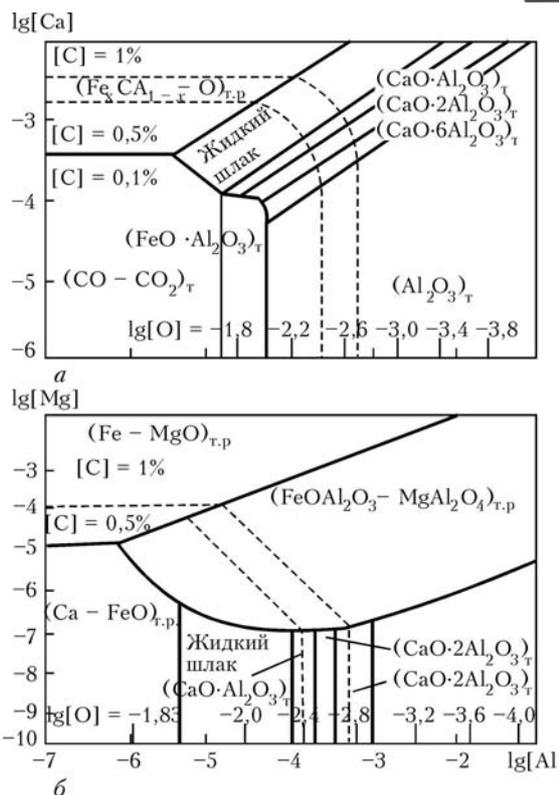


Рис. 5. Поверхности растворимости компонентов в жидком металле систем Fe-C-O-Al-Ca при 1550 °С [15, 16] (а) и Fe-C-O-Al-Ca-Mg при 1550 °С, 5 ppm [Ca] [17] (б)

включения образуются при температурах сталеварения в случае соотношения в металле [% Mn] и [% Si] как 3...8 (рис. 4).

Таким образом, если легирование и предварительное раскисление металла-полупродукта как основы стали ШХ15СГ-В производить ферросиликомарганцем с определенным соотношением марганца и кремния, в котором практически отсутствует растворенный кальций, можно создать предпосылки для образования и удаления большей части первичных неметаллических включений и получения металла с пониженным содержанием растворенного кислорода. В дальнейшем, при вводе алюминия на стадии обработки металла в ковше-печи и в ковшовом вакууматоре, должны обеспечиваться термодинамически более стабильные условия для получения стали с пониженным содержанием и глобулярных, и оксидных включений. Соотношение между количеством этих двух видов включений во многом определяется как остаточным содержанием растворенных кальция и алюминия, так и соотношением их концентраций, т. е. [%Al] : [%Ca]. Из диаграммы (рис. 5, а), иллюстрирующей фазовые равновесия в системе Fe-C-O-Al-Ca на поверхности растворимости компонентов в жидком металле, следует, что изменение количества кальция и алюминия в жидком металле приводит к формированию различных первичных включений морфологического типа: гомогенных жидкофазных растворов системы CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, алюминатов кальция  $mCaO \cdot nAl_2O_3$  и корунда Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



**Участие магния в формировании шпинельных и гетерофазных алюмокальциевых включений.** В работах [5–7] изучено влияние растворенного в подшпикниковой стали магния на формирование глобулярных гетерофазных включений, представленных шпинелью  $MgO \cdot Al_2O_3$  как самостоятельной фазой, так и шпинелидами  $(Mg, Fe^{2+})O \cdot (Al^{3+}, Cr^{3+}, Fe^{3+})_2O_3$ . Источником поступления магния в расплав при выплавке как стали в основных электропечах [18], так и ферросплавов (например, получение металлического марганца силикотермическим способом [12]) являются процессы восстановления магния углеродом [19], кремнием и алюминием из  $MgO$ -содержащих футеровок печи и шлакового пояса ковша в ходе внепечной обработки.

Согласно данным работы [20], шпинель  $MgO \cdot Al_2O_3$  в аустенитных сталях образуется при содержаниях  $[Mg]$  и  $[Al]$ , равных соответственно 1 и 10 ppm ( $T = 1873$  К). Для исключения формирования шпинели предлагается контролировать содержание  $[Mg]$  и  $[Al]$  следующим образом:

заменой  $Al_2O_3$ – $MgO$ -футеровки стен и днища ковша на доломитовую;

уменьшением содержания алюминия в используемом ферросилиции от 1 до 0,01 мас. %;

снижением содержания  $Al_2O_3$  в шлаке на выпуске из электродуговой печи от 17...23 до 5 мас. %, обновлением шлака перед обработкой на установке ковш-печь и достижением 2 мас. %  $Al_2O_3$  после обработки вместо 7 мас. % по действующей технологии.

Прецизионными исследованиями [21] подтверждено участие магния в трансформации первоначально сформировавшихся включений корунда в гетерофазную структуру, ядром которой является корунд с оторочкой шпинелью  $MgO \cdot Al_2O_3$ . Кристаллохимическая структура многофазных оксидных включений определяется физико-химическим состоянием ванны, очередностью ввода раскислителей и взаимодействием растворенных в металле элементов.

Правомочность положений о закономерностях формирования гетерофазных включений, определяемых отношением активностей растворенных элементов-раскислителей, подтверждена результатами исследований по раскислению металла магнием [22] и при обработке стали ШХ15СГ-В магнием в составе железокремниймагниевого (8 % Mg) лигатуры [6].

При вводе до 0,3 кг/т магния в стали ШХ15СГ-В опытных плавков изменялась кристаллохимическая структура оксидных включений, что обусловлено перераспределением элементов-раскислителей в процессе формирования алюмокальциевых и шпинельных фаз. Идентификация составов включений методами микрорентгеноспектрального анализа обнаружила следующее в интенсивности характеристического рентгеновского излучения  $K_\alpha$  элементов:

$$(J_{Ca}/J_{Al}) \cdot 10^3 \quad (J_{Mg}/J_{Al}) \cdot 10^3$$

действующая технология с обработкой металла синтетическим известковоглиноземистым шлаком

441                      458

обработка металла магнием-содержащей лигатурой в сочетании с синтетическим шлаком

136                      1259

Методами оптической микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа установлено, что повышение содержания магния в расплаве (48 и 25 ppm в металле соответственно опытных плавков и полученном по действующей технологии) ограничило образование шпинели  $MgO \cdot Al_2O_3$  как самостоятельной структуры и создало предпосылки для формирования в составе гетерофазных оксидных включений твердых растворов  $(Fe, Al, Mg)O$ .

Результаты выполненных исследований подтверждаются термодинамической моделью реакций взаимодействия растворенных в металле кальция, магния, алюминия, углерода с кислородом (рис. 5, б), устанавливающей соотношения указанных элементов для образования твердых растворов шпинельного ряда и жидкофазных продуктов раскисления в виде алюминатов кальция.

**Основные положения и варианты разработанной технологии легирования и раскисления стали ферросиликомарганцем MnС25.** Анализ результатов системных исследований процессов формирования оксидных фаз в структуре неметаллических включений, влияния технологических параметров выплавки и внепечной обработки сталей подшпикникового сортамента на качество металлопродукции послужило основой для разработки технологии легирования и раскисления стали ШХ15СГ-В, обеспечивающей регламентный состав гетерофазных глобулярных включений и снижение общего уровня загрязненности металла включениями.

В ходе промышленного освоения технологии раскисления и легирования стали ШХ15СГ-В использовали ферросиликомарганец MnС25 (ДСТУ 3548-97) производства ОАО «ЗФЗ». Химический состав ферросплавов MnС25, ФMn78 и ФС65 приведен в табл. 4. Как следует из данных табл. 4, содержание кальция и алюминия в MnС25, участвующих в процессе раскисления и формирования глобулярных алюмокальциевых включений, в 10...20 раз меньше, чем в составе ФС65. Поэтому при раскислении и легировании металла ферросиликомарганцем MnС25 (0,01 % Са) в сталь вводят на порядок меньше кальция, чем при использовании ФС65 (0,42 % Са) по действующей технологии.

В рамках настоящей работы проведено 15 опытно-промышленных плавков в дуговой основной электропечи ДСП-60 по пяти технологическим вариантам с использованием ферросиликомарганца MnС25, различающихся как последовательностью присадок его в печь, в ковш на выпуске плавки или на стадии обработки стали в ковше-печи, так и вводом корректирующих добавок (ферромарганца и ферросилиция) и алюминия на различных стадиях (в ковше-печи и ковшевом вакууматоре) внепечной обработки стали (табл. 5).

*Вариант 1.* Металл-полупродукт легировали в печи углеродистым феррохромом, предварительно раскислив ванну примерно 1 кг/т алюминия, затем выпускали в ковш с отсечкой печного шлака и на-



Таблица 4. Химический состав ферросплавов, использованных при проведении опытных плавов стали ШХ15СГ-В

Материал	Массовая доля элементов, %																	
	C	Mn	Si	P	S	Ca	Ni	Mo	Ti	Al	Cu	As	Pb	Sn	Zn	[O]	[N]	[H], ppm
МнС25	0,32	71,3	25,0	0,075	0,018	0,010	0,020	0,023	0,19	0,083	0,016	0,016	0,012	0,0013	0,033	0,023	0,001	15
ФМн78	6,30	79,1	1,80	0,230	0,020	0,022	0,062	0,025	0,08	0,086	0,027	0,030	0,014	0,0015	0,035	0,130	0,040	46
ФС65	0,08	0,27	64,0	0,023	0,003	0,420	0,100	0,036	0,20	2,00	0,083	0,020	0,015	0,0009	0,037	0,047	0,004	14

Таблица 5. Технологические режимы раскисления и легирования стали ШХ15СГ-В опытных плавов с применением МнС25

Вариант	Количество плавов	ДСП-50	[Ca], ppm	Ковш	Ковш-печь	[Ca], ppm	ВД	[Ca], ppm	[Ca], ppm в готовом металле	% выпадов O+S+Гл	Выход годного
1	1	Al	4,0	SiMn; Al	ФС; Al	12,0	Al	13,0	10,0	40,9	0
2	4	Al	3,5	SiMn; ФС	Al	6,8	Al	6,8	6,7	31,3	57
3	1	SiMn	3,0	Al	ФС; Al	25,0	Al	20,0	10,0	0	100
4	2	-	4,0	Al	SiMn; ФС; Al	10,0	Al	-	8,5	6,7	100
5	7	ФС	4,7	SiMn; ФС; Al	ФС; Al	7,3	Al	9,0	7,1	9,2	89
Действующая технология	-	ФС	4,0	Al	ФС; ФМн; Al	13,8	Al	10,6	9,6	15,9	64

ведением в ковше оксидно-фторидного шлака системы CaO–CaF<sub>2</sub> с соотношением компонентов 4:1. В ходе выпуска полупродукта в ковш присаживали ферросиликомарганец Мн25. Корректировку содержания марганца и кремния приносили в ков-

ше-печи. Из-за несоответствия содержания углерода в стали на стадии обработки металла в ковшовом вакууматоре вследствие малой доли поступления углерода с присадкой МнС25 (% С<0,35 %) сталь в ковше науглероживали порошком кокса, что не пре-

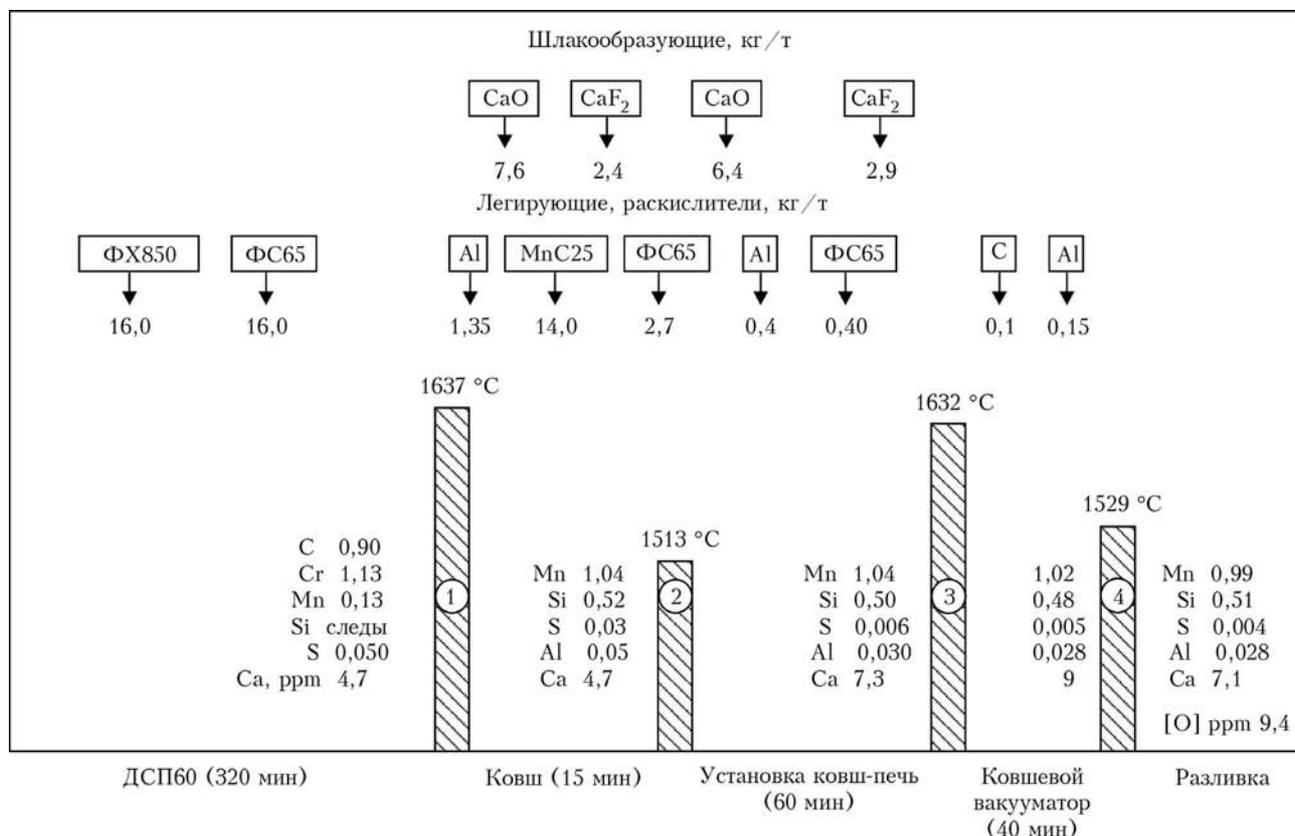


Рис. 6. Характеристика процесса легирования и раскисления стали ШХ15СГ-В ферросиликомарганцем ФМнС25: 1 – на выпуске из ДСП-60; 2 – перед обработкой в ковше-печи; 3 – в конце обработки в ковше-печи; 4 – после вакуумирования



Таблица 6. Изменение химического состава шлаков на стадиях внепечной обработки стали ШХ15СГ-В по варианту 5

Номер плавки	Номер пробы	Массовая доля компонентов, %							
		CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	S	CaF <sub>2</sub>
B15656	1	46,83	18,2	16,4	15,70	0,37	<0,15	0,47	8,72
	2	59,95	6,36	10,0	17,44	0,30	0,92	0,12	13,55
	3	53,75	7,00	12,8	17,22	<0,30	0,54	0,09	9,68
	4	50,83	13,4	10,2	17,20	<0,30	<0,15	0,20	6,00
B15710	1	48,20	7,60	9,8	15,40	<0,30	0,84	0,51	12,20
	2	53,00	8,00	7,6	15,30	<0,30	0,78	0,24	15,67
	3	53,00	9,40	8,9	16,30	<0,30	0,15	–	–
	4	50,40	10,40	13,2	15,40	<0,30	<0,15	0,71	7,74
B15775	1	57,50	10,70	16,4	14,77	0,54	0,15	0,82	8,13
	2	>61,80	6,82	14,2	15,30	0,50	1,15	0,24	7,94
	3	55,43	11,91	15,9	15,82	0,48	<0,15	0,14	8,72
	4	53,09	11,24	16,5	15,10	0,46	<0,15	0,49	8,72

Примечание. Проба № 1 — после обработки металла ТШМ в ковше, проба № 2 — в ковше-печи после обновления шлака, проба № 3 — в конце обработки в ковше-печи, проба № 4 — после вакуумирования.

дусмотрено действующей технологической инструкцией. Это способствовало повышенному загрязнению стали включениями, что учтено при анализе результатов сдаточного и исследовательского контроля заготовок и сортового проката.

**Вариант 2.** Аналогичен варианту 1, но вместе с твердыми шлакообразующими материалами (ТШМ)

и MnС25 (увеличено количество MnС25 до 850 кг на плавку) в ковш для корректировки присадили и 250 кг стандартного ФС65 на плавку.

**Вариант 3.** Особенностью этого варианта является присадка MnС25 в печь ДСП-60 перед выпуском. Корректировку химического состава металла производили в печи-ковше.

Таблица 7. Содержание элементов по ходу опытных плавков стали ШХ15СГ-В

Номер плавки	Печь на выпуске	Mn, %					Si, %				
		Ковш-печь			Вакууматор	Ковш	Ковш-печь			Вакууматор	Ковш
		1*	2*	3*			1*	2*	3*		
<i>Вариант 1</i>											
B14608	0,09	0,84	1,06	1,07	1,06	1,04	0,20	0,19	0,35	0,46	0,45
<i>Вариант 2</i>											
B14618	0,12	1,04	1,09	–	1,04	1,05	0,51	0,45	–	0,48	0,49
B14680	0,13	1,07	1,05	–	1,05	1,00	0,56	0,50	–	0,50	0,50
B14690	0,12	1,04	1,03	–	1,00	1,01	0,51	0,43	–	0,50	0,51
B14859	0,11	1,04	1,13	–	1,10	1,08	0,51	0,56	–	0,57	0,57
Среднее	0,12	1,05	1,07	–	1,05	1,04	0,52	0,49	–	0,51	0,52
<i>Вариант 3</i>											
B15114	0,13	0,88	1,13	–	1,07	1,07	0,15	0,60	–	0,58	0,57
<i>Вариант 4</i>											
B15294	0,14	0,17	1,04	–	1,01	0,99	0,09	0,42	–	0,46	0,44
B15678	0,09	0,99	1,06	–	–	1,00	0,32	0,44	–	–	0,44
Среднее	0,12	0,58	1,05	–	1,01	0,99	0,21	0,43	–	0,46	0,44
<i>Вариант 5</i>											
B15155	0,16	1,07	1,07	1,04	1,03	1,01	0,46	0,44	0,46	0,47	0,48
B15656	0,17	1,08	1,07	1,06	1,05	1,06	0,49	0,47	0,46	0,50	0,51
B15710	0,13	1,03	1,01	–	1,04	1,03	0,49	0,46	–	0,48	0,48
B15743	0,09	1,02	1,02	–	–	0,96	0,67	0,56	–	–	0,56
B15744	0,13	1,03	1,02	–	–	0,98	0,43	0,50	–	–	0,51
B15775	0,09	1,02	1,01	1,02	–	0,97	0,63	0,61	0,59	–	0,60
B15788	0,14	1,01	1,00	–	0,94	0,93	0,44	0,47	–	0,48	0,45
Среднее	0,13	1,04	1,03	1,04	1,02	0,99	0,52	0,50	0,50	0,48	0,51

\*Номера проб.



Продолжение табл. 7.

Номер плавки	Са, ppm					Вакууматор	Ковш	Al, %, ковш	S, %, ковш	O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> , ppm, прокат
	Печь на выпуске	Ковш-печь								
		1	2	3						
<i>Вариант 1</i>										
B14608	4	6	6	12	13	10	0,024	0,002	8/80	
<i>Вариант 2</i>										
B14618	4	11	5	—	5	7	0,025	0,003	8/70	
B14680	3	7	7	—	5	4	0,025	0,003	8/70	
B14690	4	5	4	—	7	7	0,029	0,006	10/70	
B14859	3	7	11	—	10	9	0,034	0,005	8/70	
Среднее	3,5	7,5	6,8	—	6,8	6,7	0,028	0,004	8,5/70	
<i>Вариант 3</i>										
B15114	3	6	25	—	20	10	0,033	0,003	10/90	
<i>Вариант 4</i>										
B15294	—	—	—	—	—	9	0,028	0,003	9/70	
B15678	4	4	10	—	—	8	0,022	0,007	9/80	
Среднее	4	4	10	—	—	8,5	0,025	0,006	9/75	
<i>Вариант 5</i>										
B15155	3	9	5	10	8	7	0,041	0,004	10/80	
B15656	8	5	6	6	8	10	0,030	0,003	9/70	
B15710	4/9	5	6	—	6	6	0,028	0,004	10/80	
B15743	6	5	5	—	—	5	0,029	0,003	10/80	
B15744	4	6	8	—	—	9	0,022	0,003	9/80	
B15775	4	5	6	6	—	6	0,024	0,004	9/80	
B15788	4	5	12	—	14	7	0,024	0,005	9/90	
Среднее	4,7	5,7	6,9	7,3	9	7,1	0,028	0,004	9,4/80	

Примечание. В числителе указано значение кислорода, в знаменателе — азота.

*Вариант 4.* Отличие этого варианта от предыдущих заключается в присадке MnC25 в ковше-печи.

*Вариант 5.* Металл-полупродукт, частично раскисленный в печи ферросилицием ФС65, выпускали в ковш с одновременной присадкой MnC25, и раскисления алюминием на штангах. В печи-ковше сталь раскислялась алюминием, а окончательное раскисление производили в вакууматоре (рис. 6).

По ходу внепечной обработки стали производили анализ химического состава шлаков (табл. 6).

Разливку металла и дальнейший передел производили в соответствии с действующими технологическими инструкциями. Изменение содержания элементов в процессе выплавки стали показано в табл. 7.

**Результаты контроля качества заготовок и сортового проката опытных плавков стали ШХ15СГ-В.**

Анализ данных, представленных в табл. 7, свидетельствует о том, что разработанная технология раскисления и легирования стали ШХ15СГ-В ферросиликомарганцем MnC25 обеспечила снижение содержания кальция в стали до 8,4 против 9,6 ppm в серийном металле, т. е. в среднем на 1,2 ppm. Лучшие результаты достигнуты на плавках вариантов 2 и 5 опытной технологии соответственно — 6,7 и 7,1 ppm, что обусловлено меньшим количеством корректирующих присадок ФС65 в ковше-печи (соответственно 30 и 25 кг на плавку). Содержание

алюминия, серы, азота и водорода в стали опытных плавков было как и в серийном металле.

Согласно техническим нормативам, отбор проб металла для контроля по неметаллическим включениям производили из прокатанных штанг одного слитка первого поддона и одного слитка последнего поддона. Горизонты отбора проб соответствовали головной (А), средней (Б) и донной (Н) частям каждого слитка. Контроль качества металла осуществляли методом максимального балла по шкалам ГОСТ 801–78, а для металла экспортного назначения, кроме того, — и по шкалам ASTM E45 (метод А).

Методология оценки металла по ASTM E45 (метод А) отличается приоритетом показателей по оксидным включениям, в то время как шкалы ГОСТ 801–78 предъявляют более жесткие требования по гетерофазным глобулярным включениям. Поэтому сравнительный анализ качества металла по двум нормативным документам является предметом дальнейших исследований.

Сводные показатели сдаточного и исследовательского контроля металла опытных плавков и полученного по действующей технологии (с применением ферросилиция ФС65 и ферромарганца ВМн78) по содержанию неметаллических включений приведены в табл. 8. Выполненный в рамках исследовательского контроля рентгеноспектральный микроанализ включений предельного балла по



Таблица 8. Результаты оценки качества металла опытных плавов стали ШХ15СГ-В по шкалам ГОСТ 801–78

Вариант технологии	Группа	Тип контроля	Количество, шт.		Выход годного, %	Вид неметаллических включений											
			партий	образцов		О			S		Г		О + S + Г				
						Средний балл	Образцы с выпадом		Средний балл	Образцы с выпадом		Средний балл	Образцы с выпадом		шт.	%	
							шт.	%		шт.	%		шт.	%			
1	I	Сдаточный	1	11	0	2,0	0	0	2,0	0	0	3,3	5	45,5	5	45,5	
		Исследуемый	1	11	0	1,8	1	9,1	1,9	0	0	2,5	3	27,3	4	36,4	
		Σ	1	22	0	1,9	1	4,5	1,95	0	0	2,9	8	36,4	9	40,9	
2	I	Сдаточный	3	25	33	2,2	9	36,0	1,8	0	0	1,9	6	24,0	15	60,0	
		Исследуемый	1	8	0	2,4	3	37,5	2,0	0	0	1,7	0	0	3	37,5	
		Σ	4	33	25	2,3	12	36,4	1,9	0	0	1,8	6	18,2	18	54,5	
	V	Сдаточный	1	12	100	2,6	0	0	2,3	0	0	2,3	1	8,3	1	8,3	
		Исследуемый	2	22	100	2,7	1	4,5	2,2	0	0	1,8	1	4,5	2	9,0	
		Σ	3	34	3	2,65	1	2,9	2,25	0	0	2,05	2	5,9	3	8,8	
I+V	Σ	7	67	57	–	13	19,4	–	0	0	–	8	11,9	21	31,3		
3	V	Исследуемый	1	8	100	1,9	0	0	2,1	0	0	2,4	0	0	0	0	
4	I	Сдаточный	1	6	100	1,8	0	0	1,5	0	0	1,5	0	0	0	0	
		»»	1	9	100	2,7	1	11,1	2,5	0	0	2,3	0	0	1	11,5	
		Σ	2	15	100	–	1	6,7	–	0	0	–	0	0	1	6,7	
5	I	Исследуемый	1	12	0	2,0	1	8,3	2,0	0	0	1,9	2	16,7	3	25,0	
		II	Сдаточный	2	24	100	1,95	0	0	1,55	0	0	2,0	1	4,2	1	4,2
		III	»»	1	6	100	2,1	0	0	2,0	0	0	1,7	0	0	0	0
		V	»»	5	45	100	2,45	2	4,4	2,3	0	0	2,35	2	4,4	4	8,9
		I+II+III+V	–	9	87	89	–	3	3,4	–	0	0	–	5	5,7	8	9,2
Действующая технология	I+II+III+V	Сдаточный	309	3538	64	–	160	4,5	–	5	0,1	–	398	11,2	563	15,9	

Примечание: 1. Здесь О – оксиды; S – сульфиды; Г – глобули. 2. Нормативные требования ГОСТ 801–78, балл, не более:

	О	S	Г
I, II группа (профиль до 40 мм)	2,0	2,0	2,0
III, IV группа (профиль до 80 мм)	2,5	2,5	2,5
V группа (профиль более 80 мм)	3,0	3,0	3,0

шкалам ГОСТ 801–78 (I группа – балл > 2, V группа – балл > 3) показал, что состав глобулярных включений представлен гетерофазными образованиями, содержащими кальций, алюминий, магний, кремний, оксидные строчечные включения сформированы с участием элементов алюминия, кальция, магния, марганца и серы.

Критериями эффективности разработанной технологии раскисления и легирования стали ферросиликомарганцем MnC25 приняты показатели выхода годного металла с первого контроля, что исключает проведение повторного на удвоенном количестве образцов и переназначение металла для прокатки на другой профиль, а также количество образцов с выпадами по включениям (глобули, оксиды, сульфиды).

Анализ данных, представленных в табл. 7 и 8, свидетельствует о том, что выплавка стали с при-

менением MnC25 по технологическому варианту 5 обеспечивает уменьшение кальция в опытном металле от 9,6 до 7,1 ppm (на 26 %) в сравнении с действующей технологией, а также снижение в 1,9 раза загрязненности глобулярными включениями (от 11,2 до 5,7 % выпадов), оксидными включениями (от 4,5 до 3,4 % выпадов) и повышение выхода годного металла с первого контроля от 64 до 89 % [23]. Приведенные показатели послужили основанием для определения рациональной схемы использования MnC25 для легирования и раскисления стали ШХ15СГ-В по технологическому варианту 5 – выпуск полупродукта, частично раскисленного кремнием в печи с отсежкой печного шлака, легирование и раскисление MnC25 в процессе слива металла в ковш, раскисление в ковше алюминием на штангах и последующая внепечная обработка на



установках ковш-печь и вакууматоре под оксидно-фторидным шлаком (рис. 6).

Экономической эффективности разработанной технологии производства стали ШХ15СГ-В с раскислением и легированием ферросиликомарганцем MnС25 без учета повышения качества металла достигают в результате снижения на 5,3 кг/т суммарного количества ферросплавов (MnС25, корректирующие добавки ФМn78 и ФС65) при одновременном сокращении удельных расходов ферромарганца на 90 и ферросилиция на 56 %, в сравнении с действующей технологией.

Положительные результаты промышленной кампании производства стали ШХ15СГ-В с применением MnС25 служат предпосылкой для дальнейшего совершенствования сквозной технологии выплавки стали указанной марки с использованием ферросиликомарганца MnС25 в соотношении марганца и кремния как 3,2... 4,3, что является одним из решающих факторов в формировании жидкофазных первичных включений и обеспечивает повышение экономических показателей производства.

### Выводы

1. Освоена разработанная инновационная технология легирования и раскисления стали ШХ15СГ-В с применением ферросиликомарганца MnС25 (ДСТУ 3548–97) взамен ферромарганца ФМn78 и ферросилиция ФС65, обеспечивающая предварительное раскисление металла с образованием жидкофазных включений системы MnO–SiO<sub>2</sub>, позволяющая снизить уровень растворенного кислорода в условиях формирования оксидных фаз неметаллических включений при одновременном уменьшении соотношения [Ca]/[Al].

2. По результатам опытных плавов с использованием ферросиликомарганца MnС25 установлено, что рациональным вариантом технологической схемы производства стали ШХ15СГ-В является ввод MnС25 в ковш на сливе металла из печи (вариант 5), что приводит к снижению содержания кальция в металле на 26 %, уменьшению загрязненности стали оксидными включениями в 1,3 раза, глобулярными — в 1,9 раза, в сравнении с показателями металла, полученного по действующей технологии.

3. Показано, что использование ферросиликомарганца MnС25 для раскисления и легирования стали ШХ15СГ-В повысило выход годного с первого контроля для I группы ГОСТ 801–78 до 89 против 64 % по действующей технологии.

1. Сравнительные опытно-промышленные исследования влияния 65%-го ферросилиция с различным содержанием кальция на загрязненность стали ШХ15СГ-В глобулярными алюмокальциевыми включениями / А. И. Панченко, А. С. Сальников, И. Н. Логозинский и др. // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 4. — С. 49–55.
2. Спектор А. Г., Зельбет Б. М., Киселева С. А. Структура и свойства подшипниковой стали. — М.: Металлургия. — 1980. — 264 с.
3. Неметаллические включения и долговечность подшипников из стали ШХ15 различных способов производства / Л. К. Оржицкая, Я. И. Спектор, Е. А. Шугульная и др. // Электрометаллургия. — 2005. — № 11. — С. 5–10.

4. Фолькмут Дж., Вильке Ф. Подшипниковые стали — новые разработки и техника испытаний для обеспечения длительного срока эксплуатации подшипников // Черн. металлы. — 2007. — № 1. — С. 49–54.
5. Гасик М. И. Магний в электростали и некоторые физико-химические аспекты проблемы получения металла подшипникового сортамента с программированным составом и количеством неметаллических включений // Металлургия и коксохимия. — Киев: Техніка, 1978. — Вып. 56. — С. 3–14.
6. Гасик М. И., Шульте Ю. А., Горобец А. П. Физико-химические закономерности процессов формирования глобулярных включений в подшипниковом металле // Изв. вузов. Черн. металлургия. — 1983. — № 5. — С. 10–15.
7. Горобец А. П. Исследование условий формирования неметаллических включений в целях снижения загрязненности подшипниковой стали глобулярными включениями: Дис... канд. техн. наук. — Днепропетровск: ДМетИ, 1984. — 185 с.
8. Сальников А. С., Логозинский И. Н., Гасик М. И. Сравнительные исследования влияния шамотного и высокоглиноземистого (импортного) сифонных огнеупоров на загрязненность заготовок и сортового проката стали ШХ15СГ-В неметаллическими включениями // Металлург. и горноруд. пром-сть. — 2007. — № 5. — С. 27–36.
9. Термодинамические предпосылки процессов формирования оксидных и глобулярных неметаллических включений при различных остаточных содержаниях кальция и алюминия / М. И. Гасик, А. И. Панченко, И. Н. Логозинский и др. // Металлург. и горноруд. пром-сть. — 2008. — № 1. — С. 48–54.
10. В. А. Григорян, А. Я. Стомахин, Ю. И. Уточкин и др. Физико-химические расчеты электросталеплавильных процессов. — М.: МИСиС, 2007. — 318 с.
11. Пивоваров Ю. Н., Дашевский В. Я. Термодинамика процессов кислорода в расплавах Fe–Mn // Металлы. — 2006. — № 4. — С. 11–16.
12. Гасик М. И., Лякишев Н. П. Физико-химия и технология электроферросплавов. — Днепропетровск: Системные технологии, 2005. — 448 с.
13. Самарин А. М. Физико-химические основы раскисления стали. — М.: Наука, 1956. — 161 с.
14. Чуйко Н. М., Чуйко А. Н. Теория и технология электроплавки стали. — Киев; Донецк: Вища шк., 1983. — 248 с.
15. Образование фаз при раскислении стали кремнием и алюминием / Г. Г. Михайлов, Е. М. Вильгельм, Л. А. Чернова, О. К. Токовой // Металлы. — 1988. — № 4. — С. 10–16.
16. Михайлов Г. Г. Термодинамические принципы оптимизации процессов раскисления стали и модифицирования неметаллических включений: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — М.: МИСиС, 1986. — 32 с.
17. Михайлов Г. Г. Влияние магния на фазовые превращения в жидкой стали // Электрометаллургия. — 2004. — № 5. — С. 11–18.
18. Жальбин В. И., Еришов Г. С. О восстановлении магния футеровки при выплавке стали, легированной алюминием // Изв. вузов. Черн. металлургия. — 1977. — № 12. — С. 69–71.
19. Горобец А. П. Физико-химические свойства щелочноземельных металлов и их поведение в металлургических расплавах // Металлургия и коксохимия. — Киев: Техніка, 1981. — Вып. 74. — С. 17–21.
20. Sakata Kimiaki. Technology of production of austenite type clean stainless steel // ISIJ Intern. — 2006. — 46, № 12. — P. 1795–1799.
21. Takata R., Yang J., Kuwabara M. Characteristics of inclusions generated during Al–Mg complex deoxidation of molten steel // Ibid. — 2007. — 47, № 10. — P. 1379–1386.
22. Исследование природы неметаллических включений подшипникового металла, обработанного магнием / М. И. Гасик, А. П. Горобец, С. Б. Вукелич, К. И. Волюшко // Металлургия и коксохимия. — Киев: Техніка, 1981. — Вып. 74. — С. 6–10.
23. Гасик М. И., Сальников А. С. Рентгеноспектральный микроанализ гетерофазных глобулярных и строчечных оксидных включений в стали ШХ15СГ-В // Металлург. и горноруд. пром-сть. — 2007. — № 6. — С. 31–37.

ОАО «Днепроспецсталь», Запорожье  
 Нац. металлург. акад. Украины, Днепропетровск  
 Поступила 26.03.2008



УДК 669.187

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ПРИ ВЫПЛАВКЕ СТАЛИ В ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

А. А. Троянский, Р. В. Синяков

Разработана схема получения в реальном масштабе времени информации о напряжении на дуге и о состоянии технологического процесса. На основе вейвлет-анализа разработан алгоритм цифровой обработки сигнала, с помощью которого можно производить его шумоподавление и сжатие. Разработан алгоритм идентификации технологических событий, позволяющий определять их на ранней стадии возникновения. Разработан комплекс программ, дающий возможность записывать сигнал о напряжении на дуге, фиксировать события, соответствующие определенным моментам съема сигнала, выполнять цифровую обработку (шумоподавление и сжатие) и формировать образ технологического события.

Scheme has been developed for obtaining the real-time information about arc voltage and condition of the technological process. Using the wavelet-analysis, the algorithm of digital processing of signal was developed, making its noise suppression and compression. Algorithm of identification of technological events was developed, allowing their determining at the earlier stage of occurrence. Complex of programs was developed, providing feasibility to record a signal about arc voltage, to record events corresponding to definite moments of signal removal, to make the digital processing (noise suppression and compression) and to form a technological event image.

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь; дуга; напряжение; сигнал; вейвлет-анализ; образ; идентификация

В основе управления любым технологическим процессом лежит первичная информация, позволяющая контролировать этот процесс. Трудности в получении такой информации заключаются в отсутствии надежно работающих первичных датчиков или в огромных затратах на бесперебойную организацию их работы.

В связи с этим предложены различные методы контроля по косвенным параметрам технологического процесса [1–9]: использование информации о гармоническом составе тока или напряжения на дуге [1–5], о значениях эксплуатационного индуктивного сопротивления [7], об изменениях постоянной составляющей напряжения фазы [8, 9] и т. д.

Созданные на этой основе методы распознавания состояний технологического процесса плавки основаны на неизменности стадии процесса в течение определенного времени и четкой последовательности их возникновения [3].

Для эффективного управления современной дуговой сталеплавильной печью (ДСП) с форсированным технологическим процессом возникает необходимость распознавания не только глобальных стадий, определяющих структуру технологического

процесса, но и событий (вскипание ванны, сход шлака, ровный ход технологического процесса, дуга «открыта» и т. д.), существование которых определяется секундами, а сменяют друг друга они в произвольной последовательности. Поэтому актуальной становится задача разработки алгоритма представления событий на основе информации о сигнале напряжения на дуге в надежном и достаточном виде для дальнейшей идентификации.

Непосредственное получение сигнала о мгновенном напряжении на дуге ДСП достаточно проблематично из-за ряда технических причин, прежде всего высокого напряжения, которое колеблется в диапазоне 0... 1000 В. Поэтому в качестве источника сигнала использовали вольтметр, измеряющий мгновенное напряжение дуги, а аналогово-цифрового преобразователя — звуковую карту персонального компьютера с частотой дискретизации 22 кГц. Обработанный сигнал о напряжении на дуге записывали на жесткий диск и передавали для визуализации. Параллельно оператор (технолог) на основании визуальной и звуковой информации фиксировал состояние технологического процесса, также записываемое на жесткий диск.

Анализ получаемого сигнала показал наличие связи его формы с наступившими событиями в печи (рис. 1). С учетом этого последующая задача сво-



дилась к разработке получения формализованного алгоритма выделения образа соответствующего технологического события.

Традиционным математическим аппаратом, используемым при анализе сигнала о напряжении или токе на дуге, является преобразование Фурье. В работах [2–5] показано, что по так называемым информативным признакам (отношение амплитуд гармоник, среднего значения амплитуд гармоник, дисперсии тока и амплитуд гармоник) можно контролировать период проплавления колодцев, определять окончание периода расплавления шихты окислительного периода. Выполненный авторами анализ полученного сигнала с использованием Фурье-анализа (рис. 2) подтверждает представленные выше выводы о возможности распознавания глобальных стадий (событий) технологического процесса. Вместе с тем отсутствует явная зависимость представленных выше признаков для событий, связанных, например, с поведением шлака. Эти события возникают в свободной последовательности и скоротечны. Более того, подобные события необходимо идентифицировать уже на этапе зарождения, т. е. оценивать динамику каждого события. При этом образ должен нести информацию о сигнале за интервал времени.

Установлено [10], что преобразование Фурье оказывается недостаточно эффективным при анализе сигналов быстропротекающих нестационарных процессов. Фурье-анализ дает возможность определить факт присутствия в сигнале любой частоты и интервал ее присутствия, однако не позволяет установить факт наличия определенной частоты в сигнале в конкретный момент времени [11], что зачастую является решающим при идентификации возникновения, развития и исчезновения определенного события технологического процесса. По этой причине при анализе нестационарных сигналов все большее распространение получает подход, в котором для различных диапазонов частот используют временные окна различной длительности. Оконные функции получают в результате растяжения–сжатия и смещения по времени базисных функций, названных вейвлетами [12].

С учетом изложенного в качестве основного инструмента для обработки данных предложен вейвлет-анализ.

Для каждого фиксируемого события выделяли предшествующий ему за одну секунду сигнал. Далее для более детального анализа и создания эффекта развития события исходный сигнал разбивали на равные периоды, длина которых кратна степени двойки или равна 2048 отсчетам. В результате получали для каждого образа 10 подобразов. Но и в таком виде использовать информацию о форме сиг-

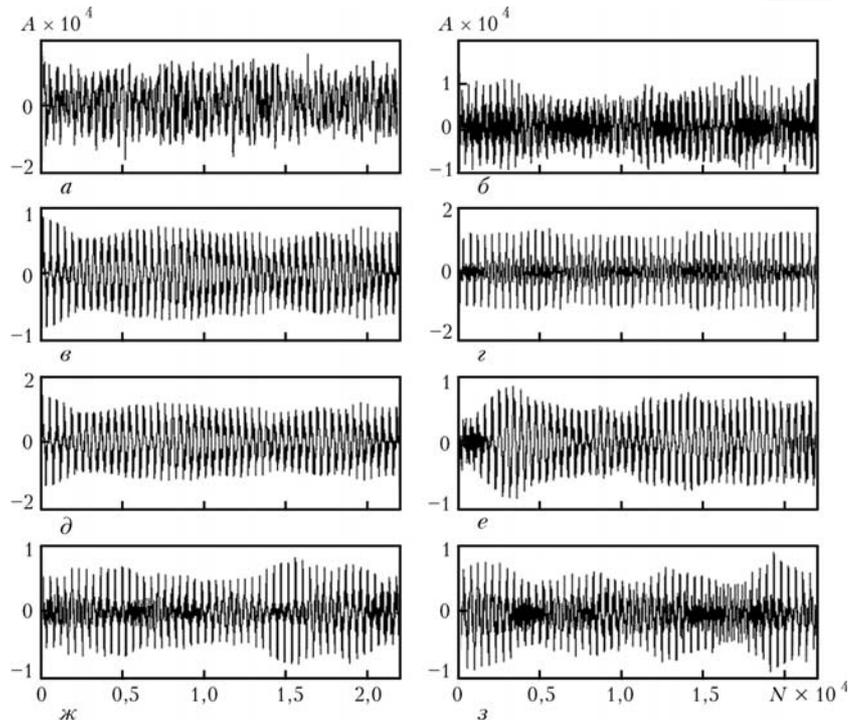


Рис. 1. Вид сигнала при разных состояниях технологического процесса (за одну секунду — 22050 отсчетов): а — проплавление колодцев; б — окончание плавания шихты из первой корзины; в — равномерный ход процесса; г — окончание проплавления шихты из второй корзины; д — дуга «открыта»; е — медленный сход шлака; ж — шлак на уровне порога; з — сильный сход шлака; А — амплитуда сигнала; N — количество отсчетов сигнала

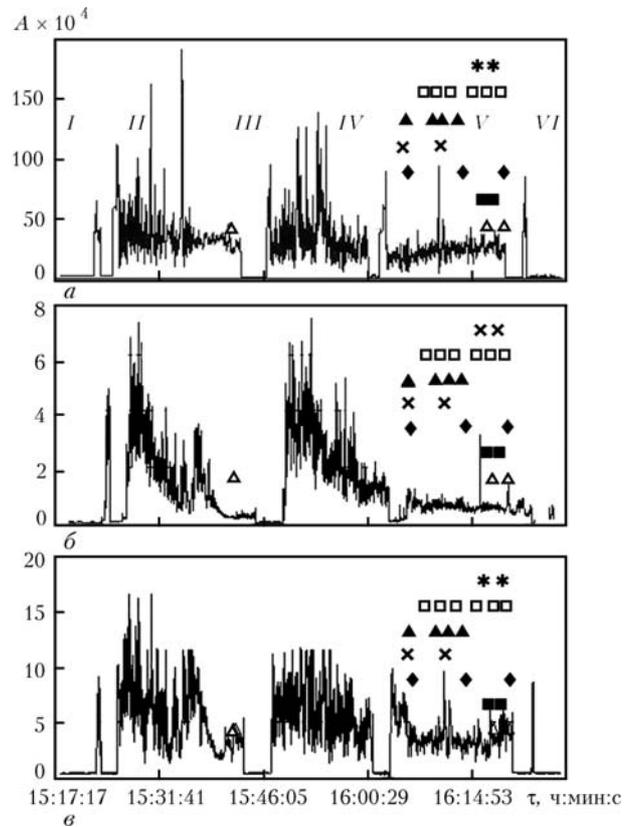


Рис. 2. Вид первых трех гармоник сигнала о напряжении на дуге в процессе плавки в ДСП: I — завалка; II — плавление; III — подвалка; IV — плавление шихты из второй корзины; V — окислительный период; VI — выпуск; Δ — печь работает ровно; ■ — шлак трещит; ◆ — шлак пошел слабо; X — шлак пошел средне; ▲ — шлак пошел сильно; □ — шлак на уровне порога; + — шлак ниже порога



нала в качестве образа события затруднительно. Необходимо очистить сигнал от шумов и снизить его размерность.

Использовали типовой метод подавления шумов — удаление высокочастотных составляющих из спектра сигнала. Применительно к вейвлетным разложениям это может быть реализовано непосредственно удалением детализирующих коэффици-

ентов высокочастотных уровней. Среди существующих в настоящее время парадигм шумоподавления наибольшее распространение получила парадигма Донохо-Джонстона [13]. Она является довольно простой для реализации, экономичной в вычислительном отношении, поскольку подразумевает использование лишь быстрых алгоритмов вейвлет-преобразования и содержит три шага, которые в

случае последовательного применения к исходному сигналу создают эффект шумоподавления. Таким образом, анализируемый сигнал подвергают дискретному вейвлет-преобразованию до седьмого уровня (рис. 3).

В роли анализирующего выбрали вейвлет Добеши десятого порядка [12], характеризующийся свойствами, необходимыми для дискретного вейвлет-преобразования. Затем определили пороговое значение шумовой добавки как максимальную амплитуду кривой, отражающей коэффициенты детализации первого уровня разложения. После этого обратили в нуль коэффициенты детализации всех уровней, абсолютные значения которых меньше заданного порога, и выполнили обратное вейвлет-преобразование (рис. 4).

Схема сжатия сигнала аналогична приведенному процессу шумоподавления. Ключевым моментом является выполнение пороговой обработки вейвлет-коэффициентов. При сжатии неизбежно появление систематических ошибок. Получающиеся погрешности пропорциональны значению отброшенных коэффициентов.

Существует несколько критериев выбора порога. Рекомендуется использовать «жесткую» пороговую фильтрацию. При этом коэффициенты, абсолютные значения которых не превышают порогового, обнуляются, а все остальные остаются без изменения. Такой метод фильтрации позволяет более точно восстановить резкие изменения сигнала (скачки, узкие пики и т. п.) и сохранить большее количество энергии при реконструкции сигнала. Например, можно использовать критерий баланса между количеством нулевых коэффициентов и остаточной энергией сигнала. Суть этого метода заключается в том, что коэффициенты детализации с абсолютным значением, близким к нулю, содержат лишь небольшую часть энергии сигнала. Обнуление этих коэффициентов приводит к незначительным потерям энергии. Оптимальным является такое значение порога, при котором процент обнуляемых коэффициентов детализации будет приблизительно равен проценту остаточной энергии сигнала после пороговой фильтрации.

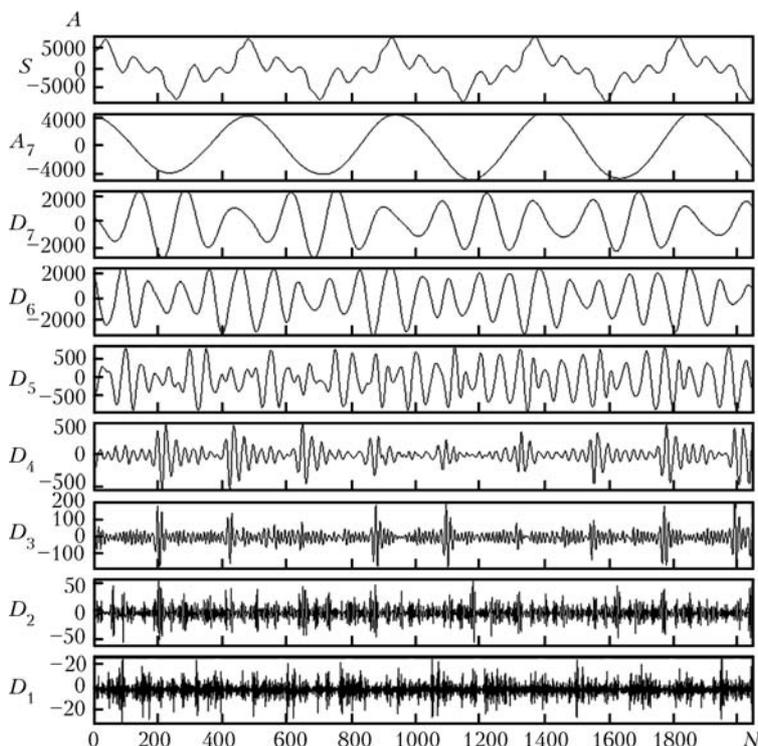


Рис. 3. Многоуровневое дискретное вейвлет-разложение сигнала:  $S$  — исходный сигнал;  $A_i$ ,  $D_i$  — коэффициенты соответственно аппроксимации и детализации

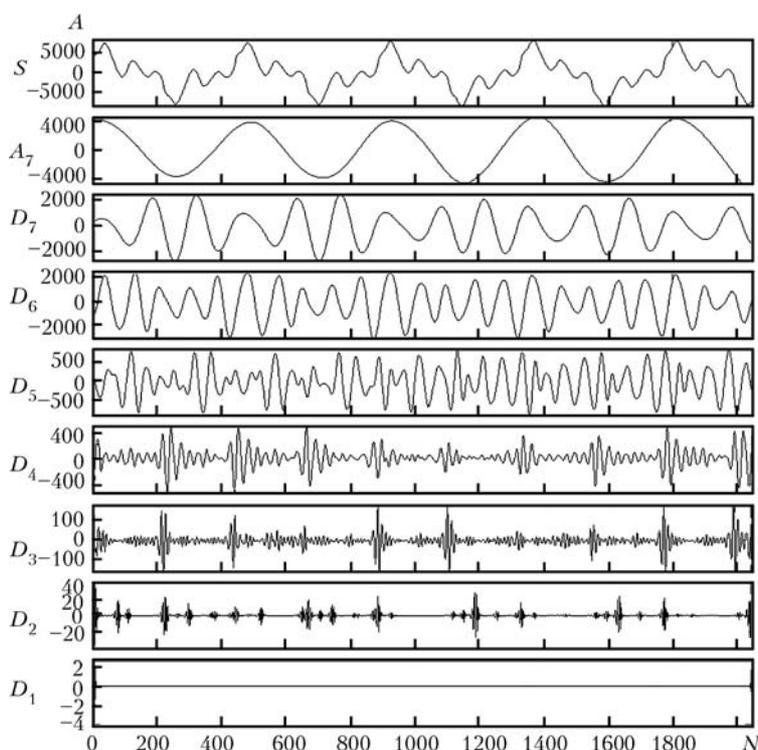


Рис. 4. Восстановленный сигнал

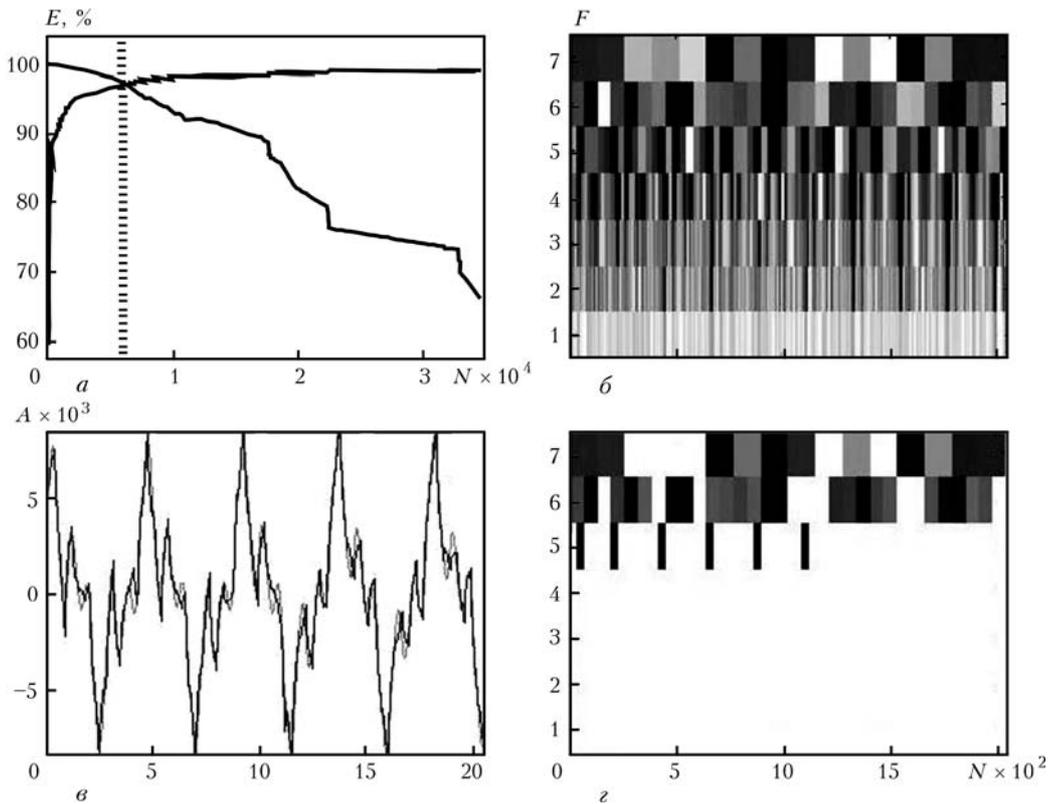


Рис. 5. Сжатие сигнала с использованием общей энергии: *a* — критерий сжатия — баланс  $E$  между количеством нулевых коэффициентов (серая линия) и остаточной энергией сигнала (темная линия); *б* — сравнение исходного сигнала и восстановленного; *в*, *г* — коэффициенты уровней детализации  $F$  соответственно до и после сжатия

С целью опробования данного метода выполнили дискретное вейвлет-разложение сигнала до седьмого уровня, для чего использовали базисную функцию вейвлет Добеши второго порядка [12]. Оптимальное сжатие достигнуто при 97 % общей энергии коэффициентов (рис. 5). При этом общее количество коэффициентов осталось достаточно большим для использования в качестве образа события.

По этой причине использовали метод селективного отбора значащих коэффициентов вейвлет-разложения. Основную информативную нагрузку несут коэффициенты детализации шестого и седьмого уровней (рис. 5, *г*). При визуальном оценивании степени восстановления сигнала (рис. 6) оставили 18 значений коэффициентов аппроксимации седьмого уровня и по десять коэффициентов шестого и седьмого уровней, имеющих абсолютное максимальное значение, что обеспечивает необходимое сжатие сигнала и достаточную информацию об исходном сигнале (рис. 6, *к*).

Далее полученные коэффициенты вейвлет-разложения ор-

ганизовали в вектор свойств (образ), имеющий 38 коэффициентов и представляющий собой массив коэффициентов, последовательно соединенных из

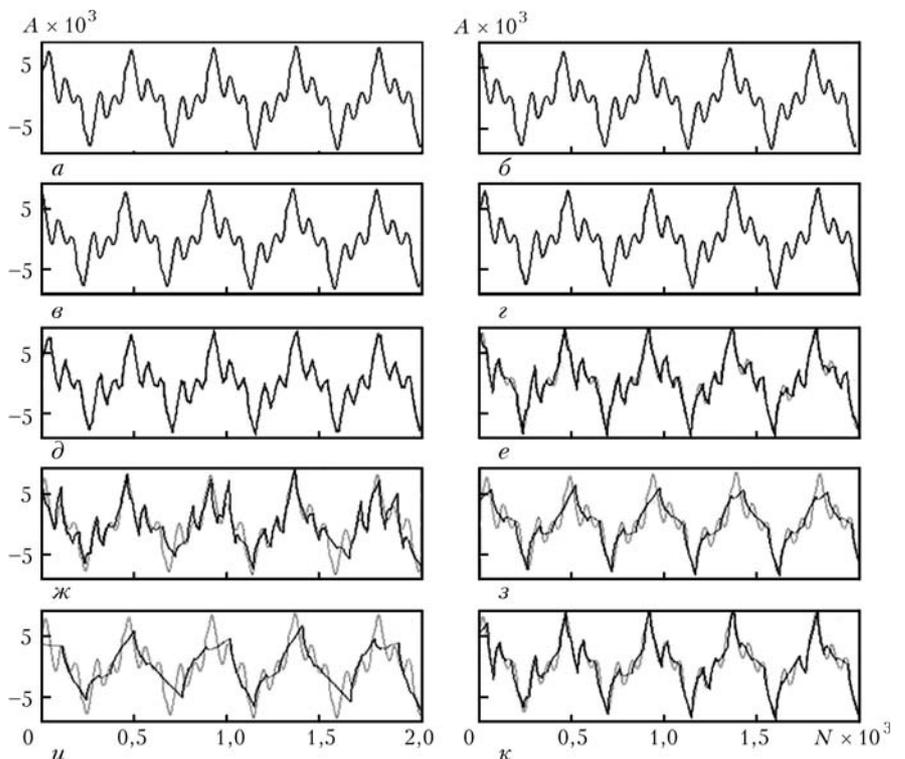


Рис. 6. Сравнение результатов восстановления сигнала при разной степени сжатия (серая линия исходный сигнал, темная — восстановленный): *a* — восстановление по 2048 коэффициентам; *б* — 1038; *в* — 524; *г* — 266; *д* — 136; *е* — 70; *ж* — 52; *з* — 36; *и* — 18; *к* — 38 (селективный выбор)



Рис. 7. Образ сигнала

коэффициентов аппроксимации седьмого уровня (18 значений), коэффициентов детализации седьмого уровня (10 значений) и коэффициентов детализации шестого уровня (10 значений). Для каждого события получили свой образ сигнала в виде набора коэффициентов (штрих-код на рис. 7).

Поскольку использовали сигнал длительностью в 1 с, а образ события равен 0,1 с, получили 10 образов, характеризующих конкретное событие. Это позволяет повысить степень вероятности распознавания событий.

По представленному алгоритму создания образов технологических событий записаны сигналы и обработаны данные по 20 плавкам в ДСП-1 Белорусского металлургического завода. Визуально и статистически оценены полученные данные по каждому событию для разных плавков. С вероятностью 67 % образы аналогичных событий разных плавков совпадали, а примерно 15 % образов находились в области доверительного интервала совпадения. Остальные 18 % образов имели отклонения от среднестатистических показателей для каждого события. Поэтому для дальнейшего развития представленного алгоритма идентификации событий технологического процесса необходимо использовать более мощные и гибкие методы классификации представленных образов (рис. 7), например нейронные сети.

Таким образом, разработанные методика и алгоритм формирования образов событий технологического процесса в ДСП на основе информации о форме сигнала напряжения дуги, обработанного с использованием вейвлет-анализа, позволили получать образы, характеризующие динамику развития событий.

1. *Зацепин Е. П., Ладанов А. С., Захаров К. Д.* Информационно-измерительный комплекс для дуговых сталеплавильных печей // *Сталь*. — 2004. — № 3. — С. 23–26.
2. *Хусид Ф. Б., Эдемский В. М., Подвальный Б. А.* Получение информации о ходе технологического процесса электроплавки стали косвенным методом // *Бюл. ин-та «Черметинформация»*. — 1974. — № 5. — С. 47–48.
3. *Метод* определения технологических стадий процесса плавки и прогнозирования моментов их окончания в дуговой печи / *Б. Д. Денис, О. Ю. Лозинский, Л. Д. Костинюк, В. Я. Первознюк* // *Электротехника*. — 1985. — № 2. — С. 8–10.
4. *Ситуаційне* керування в дугових печах: Монографія / *Л. Д. Костинюк, А. О. Лозинський, О. Ю. Лозинський та інші*. — Львів: Львівська політехніка, 2004. — 382 с.
5. *Волкодав С. Н., Евсеева Н. В., Токовой О. К.* Метод расчета энерготехнологического режима плавки в высокоомной дуговой печи // *Сталь*. — 2000. — № 2. — С. 24–27.
6. *Рис М., Зессельман Р.* Оптимизация управления электродуговой печью с использованием нейронной сети // *Тр. третьего конгресса сталеплавыльщиков*. — М.: ОАО «Черметинформация». — 1996. — С. 158–163.
7. *Повышение* эффективности работы электропечи при использовании лома низкой насыпной плотности / *В. А. Рулев, Н. Т. Никокошев, В. Ф. Плуготоренко, В. Я. Мищенко* // *Сталь*. — 1978. — № 3. — С. 26–28.
8. *Рыженков А. Н., Дрогин, В. И. Троянский А. А.* Эффективная система управления энергетическим режимом высокоомной дуговой печи // *Тр. четвертого конгресса сталеплавыльщиков*. — М., 1997. — С. 178–182.
9. *Использование* устройства непрерывного контроля окисленности шлака при выплавке электростали / *С. Б. Свиридов, С. Л. Черепанов, В. В. Рябов и др.* // *Сталь*. — 1997. — № 10. — С. 32–33.
10. *Карпенко С. В.* Математическое моделирование нестационарных электрических процессов в электротехнических системах на основе численных методов вейвлет-анализа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Новокузнецк, 2006. — 22 с.
11. *Астафьева Н. М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физических наук*. — 1996. — **166**, № 11. — С. 1145–1170.
12. *Добеши И.* Десять лекций по вейвлетам. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. — 464 с.
13. *Donoho D. L., Johnstone I. M.* Neo-classical minimax problems, thresholding, and adaptation // *Bernoulli*. — 1996. — № 1. — P. 39–62.

Донецкий нац. техн. ун-т

Поступила 05. 06. 2008



## ВЫСТАВКА «СВАРКА. РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — 2008»

7–9 апреля 2008 г. в выставочном центре «КиевЭкспоПлаза» прошли промышленные выставки «ПАТОН ЭКСПО», объединившие такие экспозиции, как «Сварка. Родственные технологии», «Трубопроводный транспорт», «Неразрушающий контроль», «Защита от коррозии», «Промышленная экология», «Крепления и инструменты», «Измерения. Лабораторное оборудование», организатором которых выступил Центр трансфера технологий ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины при поддержке Общества сварщиков Украины, НАК «Нефтегаз Украины», Ассоциации ОКО, Ассоциации промышленного арматуростроения Украины, Ассоциации производителей и строителей полимерных трубопроводов Украины.

Всего в рамках выставки «Сварка. Родственные технологии» свои достижения экспонировали 48 участников из 5 стран — Украины, России, Литвы, Италии, Чехии. Среди них ИЭС им. Е. О. Патона, ОКТБ и два опытных завода (ОЗСО и ОЗСЭМ) ИЭС им. Е. О. Патона, НТЦ «СЕПРОЗ», Межотраслевой учебно-аттестационный центр, такие известные производители оборудования для сварки, резки и пайки, как «КЗЭСО» (г. Каховка), фирма «СЭЛМА» (г. Симферополь), «Фрониус-Украина» (Киевская обл.), «Коммунар» (г. Харьков), «СиМЗ» (г. Симферополь), «ДОНМЕТ» (г. Новокраматорск), «ГРПЗ» (г. Рязанов), «Зонт» (г. Одеса), производители сварочных материалов, «Лосиноостровский электродный завод» (г. Москва), «Торговый дом», «Межгосметиз» (г. Мценск), «Плазматек» (г. Винница), «Anyksciu Varis» (г. Аникщай). Значительную долю экспозиций выставки занимали представительства известных мировых



брендов в области сварочного производства (ESAB, Lincoln Electric, Kemppi, Bohler, Abicor Binzel, Weldoterm и др.) — ООО «ЭСАБ» в Украине, «Бинцель Украина», «Велдотерм-Украина», «Интерхим-БТВ», «Вистек» и др. Еще большее количество стендов представляли торгующие организации — «Абпланалп Украина», «Авдекс», «АВЦентр», «Дары природы», «Двелд», «Идель», «Индустриальный метизный союз», «Линкольн Электрик Европа», «Мигатех», «Русо», «Сварком» и др. Отрадным является факт, что впервые на специализированных выставках Украины сразу несколько фирм — «Panasonic» (диллер «Артан», г. Киев), НАВКО-ТЕХ (г. Киев) — демонстрировали роботехнические сварочные комплексы. Это, несомненно, обусловлено возрастающим интересом промышленности Украины к вопросам автоматизации производственных процессов.

Достижения итальянских предприятий представлены на стенде «Mira Italy» (производство оборудования для дуговой сварки и термической резки,





нержавеющей и алюминиевой стальной сварочной проволоки и прутков, а также порошковых проволок).

Чехию представляла компания «MGM» — производитель плазменных и газокислородных машин термической резки. Характерно, что все они комплектуются системами удаления обработанных газов. Она также демонстрировала свою новую разработку — ультразвуковую установку для сварки солнечных элементов.

В период работы выставки состоялась конференция Общества сварщиков Украины на тему «Пути развития сварочного производства Украины в связи со вступлением во Всемирную торговую организацию», а также прошли заседания ряда секций конференции по неразрушающему контролю.

В рамках «ПАТОН ЭКСПО» весьма представительной (15 стендов) выглядела экспозиция фирм и компаний, работающих в области неразрушающего контроля и технической диагностики. Среди них — «Изотоп», «Научно-производственный ди-

агностический центр», Ассоциация «ОКО», «Ультракон», представительство американской фирмы «National Instruments» (г. Киев), «Интрон» (г. Одесса), «Машиностроение» (г. Днепропетровск), «Olympus Moscow» (г. Москва), а также торговые организации — «Киевпроминвест», «Онико», «Пергам», «Твема» (г. Киев), «Сперанца» (г. Желтые Воды).

В целом выставка продемонстрировала современное состояние сварочного производства и новые тенденции в разработке и производстве широкого спектра оборудования и материалов различного назначения.

В заключение следует отметить, что ежегодная выставка «Сварка. Родственные технологии» уже традиционно является основной профильной выставкой в Украине. В течение трех дней работы ее посетили многочисленные специалисты из многих регионов Украины.

*В. Н. Луподаев*



## Международная конференция «Ti-2008 в СНГ»

18–21 мая 2008 г. в г. Санкт-Петербурге (Россия) состоялась организованная межгосударственной ассоциацией «Титан» традиционная ежегодная международная конференция «Титан в СНГ». В ней приняли участие более 250 участников из России, Украины, Беларуси, Таджикистана, США, Германии, Италии, Японии, Люксембурга, Польши и других стран. На конференции с докладами выступили ученые и специалисты в области титана из таких ведущих научно-исследовательских организаций и промышленных предприятий России, Украины, Беларуси и других стран, как ФГУП «Всероссийский институт авиационных материалов», ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, ОАО «Всероссийский институт легких сплавов», «МАТИ» — Российский государственный технологический университет им. К. Э. Циолковского, Уральский государственный технический университет «УПИ», ОАО «Корпорация «ВСМПО-АВИСМА», ФГУП «Гиредмет», ОАО «Уралредмет», ЗАО «Зубцовский машиностроительный завод», ОАО «Калужский турбинный завод», Государственный научно-исследовательский и проектный институт титана, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Институт геологических наук НАН Украины, Запорожская государственная инженерная академия, КП «Запорожский титано-магнелиевый комбинат», АНТК им. О. К. Антонова, ОАО «Украинский графит», ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси» и др. Всего прочитано более 100 докладов.

Традиционно большое количество докладов на конференции представили специалисты ОАО «Корпорация «ВСМПО-АВИСМА», одного из ведущих мировых производителей титановых полуфабрикатов ответственного назначения, обеспечивающего 100 % потребностей в титановых деталях для судно- и авиастроительных предприятий России, Украины и Узбекистана, 40 % — для фирмы «Boeing», 60 % — для фирмы «EADC» (включая «AIRBUS»). ОАО «Корпорация «ВСМПО-АВИСМА» является предприятием полного технологического цикла по выпуску титановой продукции (от производства губчатого титана до изготовления труб, прутков, листа и поковок). Основным направлением её развития является освоение новых, более высокотехнологичных этапов изготовления продукции из титана — финишной механической обработки штамповок для дисков газотурбинных двигателей и шасси авиалайнеров, теплообменников и др.

Значительное количество докладов представили ученые из «МАТИ» — Российский государственный технологического университета им. К. Э. Циолковского, где ведутся интенсивные исследования в области материаловедения титана и его сплавов, в том числе с целью применения в медицине.

Представители КП «Запорожский титано-магнелиевый комбинат» подробно осветили основные направления совершенствования технологии производства губчатого титана в Украине и дальнейшего развития завода. Следует отметить, что в 2008 г. на КП «ЗТМК» будет введена в эксплуатацию электронно-лучевая установка для производства титановых слитков и слябов массой до 5 т, изучается возможность создания прокатного цеха для дальнейшего передела выплавляемых слитков в лист.

Доклады специалистов ИЭС им. Е. О. Патона были посвящены выплавке способом электронно-лучевой плавки слитков диаметром до 1200 мм и массой до 20 т, исследованию механизмов удаления включений нитрида титана из его расплава, электрошлаковому переплаву титана с электромагнитным перемешиванием расплава, а также термической обработке сварных соединений нового отечественного титанового сплава Т110, они вызвали большой интерес участников конференции.

Из всего разнообразия сварочных технологий на конференции наибольшее внимание уделяли вопросам сварки взрывом биметаллических плит для изготовления теплообменников и производства сварных литых конструкций с целью снижения себестоимости изделий. Значительный интерес на конференции вызвали вопросы применения титана в авиастроении, энергетическом машиностроении, судостроении и производстве изделий медицинского назначения (эндопротезы, импланты, инструмент и др.). В связи с резким ростом объемов применения композитных материалов при изготовлении самолетов нового поколения увеличилась и доля используемых деталей из титановых сплавов, являющихся наилучшим конструкционным материалом для изготовления силовых конструкций планера самолета.

Среди новых областей применения титана следует отметить строительство заводов по производству сжиженного газа и регазификационных терминалов (до 250 т титанового проката на одну установку), а также атомную промышленность (в частности, производство теплообменной аппаратуры для АЭС).

В связи со значительным ростом объемов производства (особенно в Китае) рынок титана в настоящее время характеризуется повышением уровня конкуренции, что обуславливает снижение цен на изделия из титана и повышение требований к их качеству. Дальнейшее развитие этих тенденций открывает хорошие перспективы по увеличению объемов использования титана в различных гражданских отраслях промышленности. В заключение хотелось бы отметить высокий уровень проведения конференции и выразить благодарность ее организаторам в лице ЗАО «Межгосударственная организация «Титан» и ее председателя А. В. Александрова.

С. В. Ахонин



# IX МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-ВЫСТАВКА «ПРОБЛЕМЫ КОРРОЗИИ И ПРОТИВОКОРРОЗИОННАЯ ЗАЩИТА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ» — «КОРРОЗИЯ-2008»

10–12 июня 2008 года во Львове в Доме ученых состоялась IX Международная конференция-выставка «Коррозия-2008», посвященная 90-летию образования Национальной академии наук Украины. В ее работе приняли участие ученые из 14 стран, в том числе из США, Великобритании, Германии, Италии, Польши, Мексики, Кувейта, Латвии и стран СНГ. Представлено 186 докладов от 60 фирм и организаций. Учасников конференции приветствовали президент НАН Украины Б. Е. Патон, заместитель министра промполитики, руководство Физико-механического института им. Г. В. Карпенко НАНУ (соорганизатора конференции). Конференцию открыл глава Украинской ассоциации коррозионистов чл.-кор. НАН Украины В. И. Похмурский, который осветил основные достижения отечественной науки в этой отрасли и охарактеризовал главные направления исследований основных научных центров Украины по изучению проблем противокоррозионной защиты конструкционных материалов во время их эксплуатации.

Научные доклады, представленные участниками конференции, сгруппированы по следующим направлениям: фундаментальные аспекты коррозии и коррозионно-механического разрушения; водородная и газовая коррозия; новые коррозионно-стойкие материалы; газотермические, гальванические и другие покрытия; ингибиторная, биоцидная и электрохимическая защита, противокоррозионная защита нефтегазового, энергетического и химического оборудования; коррозия и экологические проблемы; проблемы подготовки специалистов-коррозионистов.

Доклады, представленные на конференции, характеризовались наличием не только традиционных подходов, но и появлением ряда новых взглядов и решений, позволяющих сделать существенный шаг в развитии представлений о процессах, протекающих на поверхности металлов во время коррозии. К этой категории можно отнести доклад В. Похмурского, В. Копыльца и С. Корниа (Украина), в котором процесс коррозии рассматривается с позиций квантовой химии с использованием методов молекулярной динамики; доклад С. Гирного и М. Макнеллана (Украина–США) о взаимосвязи влияния среды и потенциала ионизации на пластические свойства низкоуглеродистой стали; А. Паничкина, Э. Сулейманова (Россия) об исследовании внедрения атомов кислорода в стабильную структуру при нестационарном воздействии.

Некоторым другим докладам присуща новизна подхода или нетрадиционность решений. В частности, Я. Ивацкий с сотрудниками (Украина) показали, что использование магниторелаксационного метода для исследования наводороженного металла дает возможность прогнозировать остаточный ресурс элементов конструкций, работающих в водородсодержащей среде. В докладе В. Витвицкого (Украина) предложено для оценки равновесного фазообразующего состояния коррозионно-стойких сталей использовать новый количественный показатель  $A_{\gamma}$ , рассчитанный по химическому составу исследуемого материала. На 15 исследованных сталях показано, что материалы с  $A_{\gamma} < 1$  катастрофически деградируют в водородной среде, у работоспособных в водороде сталей  $A_{\gamma} > 1$ , а у водородостойких сталей  $A_{\gamma} \sim 1,64 \dots 2,0$ . Следовательно,

появляется возможность сознательного выбора водородостойких материалов по их химическому составу без предварительного проведения соответствующих дорогих и длительных испытаний.

Интересен и методический подход, реализованный М. Сахненко, С. Лайоном и др. (Украина–США), связанный с использованием одновременного параллельного прохождения двух реакций для повышения коррозионной стойкости сплавов  $(Al-Cu-Mg)_s$  типа Д16: ионизация сплавообразующих компонентов и образование комплексов, способных растворяться в объеме электролита. Таким образом, в результате гальванохимической обработки в режиме микродугового оксидирования в присутствии лигандов образуются прочные комплексы с легирующими компонентами сплава алюминия, что обеспечивает гомогенизацию поверхности и снижение гетерорезистивности. Такой подход к повышению коррозионной стойкости многоэлементных сплавов, в том числе и сталей, является перспективным.

Значительное внимание участники конференции уделили вопросам защиты от коррозии промышленного оборудования (нефтехимического, химического, энергетического), изучению процессов коррозионного и механического разрушения сталей в условиях эксплуатации, формированию и росту трещин в контакте с водородсодержащей средой при эксплуатации и др.

На заключительном заседании чл.-кор. НАН Украины В. И. Похмурский отметил не только высокий научный уровень представленных докладов и довольно широкую географию городов, научных центров (Украина — 17, Польша — 11, Россия — 5 и т. д.), но и большое количество молодежи, принимавшей активное участие в работе конференции.

Все доклады, представленные на конференции, были опубликованы в специальном выпуске журнала «Физико-химическая механика материалов» (два тома).

Параллельно с научной конференцией в этом же помещении проходила и специализированная выставка новых разработок, касающихся вопросов защиты от коррозии. Были представлены новые ингибиторы, лаки, краски, защитные покрытия и т. д., а также контрольно-измерительная аппаратура для фиксации мест коррозионного повреждения и изучения самого процесса коррозии. В работе выставки приняли участие 32 организации и фирмы из Украины, Германии и США. Наиболее представительным являлся стенд Физико-механического института НАНУ и сотрудничающих с ним предприятий. Среди их разработок — прибор для акусто-эмиссионного контроля материалов; магнитные приборы для обследования подземных трубопроводов и сооружений, установка для анализа и микрофильмирования структурных изменений в приконтактных зонах материалов в процессе трения; программный комплекс «Материалы» для обработки и количественного анализа металлографических изображений; ультразвуковой вычислительный томограф для оценки основных механических характеристик материала — упругих, прочностных, технологических (твердость) и др.

О. Д. Смян



## НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ

### О. А. Троянському – 60

**4 квітня 2008 р.** виповнилось 60 років професору Олександрю Анатолійовичу Троянському, першому проректору, завідувачу кафедри «Електрометалургія» Донецького національного технічного університету (ДонНТУ).

Вся його трудова діяльність пов'язана з Донецьким національним технічним університетом. О. А. Троянський має 37-річний науково-педагогічний стаж. У 1971 р. він закінчив Донецький політехнічний інститут (ДПІ) за фахом «Металургія чорних металів». По закінченні інституту пройшов шлях від асистента до першого проректора ДонНТУ.

В 1974 р. Олександр Анатолійович закінчив аспірантуру і захистив кандидатську дисертацію під керівництвом академіка Б. І. Медовара в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона (м. Київ) за фахом 05.16.07 «Металургія металів високої чистоти та прецизійних сплавів». У 1975 р. йому присвоєно науковий ступінь кандидата технічних наук, а в 1993 р. — вчене звання професора.

В 2008 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.182.01 Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України О. А. Троянський захистив докторську дисертацію на тему «Розвиток наукових і технологічних основ керування якістю електродугового й електрошлакового металу» за спеціальністю 05.16.02 «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів». Дисертаційна робота О. А. Троянського — це підсумок багаторічних досліджень, які проводилися у дослідницьких лабораторіях та промислових цехах металургійних та машинобудівних підприємств України, Росії та Білорусії впродовж останніх 37 років. Вона внесла суттєвий вклад у розвиток теорії та практики електрометалургії (ДСП, ЕШП). Сьогодні О. А. Троянський — відомий вчений у галузі металургії, автор понад 200 наукових публікацій та патентів. Він приймав активну участь у більш як 30 міжнародних симпозиумах, конгресах, науково-технічних конференціях і семінарах. О. А. Троянський — академік Української технологічної академії. Під час роботи в ДПІ–ДонНТУ О. А. Троянський був керівником та виконавцем понад 20 науково-дослідних державних та господарчих тем. У 2007 р. О. А. Троянський став лауреатом Державної премії України у галузі науки і техніки.

О. А. Троянському присвоєно звання «Заслужений працівник народної освіти України». Він здійснює наукове керівництво аспірантами — підготував шістьох кандидатів технічних наук у галузі загальної та спеціальної електрометалургії.

Завдяки своїй високій ерудиції, людським якостям та принциповості Олександр Анатолійович користується повагою як у студентському середовищі, так і серед колег.

Від усієї душі поздоровляємо ювіляра, бажаємо йому міцного здоров'я, щастя, подальших успіхів на користь нашої Вітчизни.

*Ин-т электрозварювання им. Е. О. Патона НАН Украины*

*Редколегия журнала*

*«Современная электрометаллургия»*

### Н. Т. Шевченко — 70

**3 июля 2008 г.** исполнилось 70 лет известному специалисту в области электрошлаковой технологии, лауреату Государственной премии Украины в области науки и техники Николаю Трофимовичу Шевченко.

Свою трудовую деятельность Н. Т. Шевченко начал в 1961 году в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, успешно продолжает её и сегодня.

За эти годы отчётливо проявились и развились не только незаурядные способности Н. Т. Шевченко инженера-сварщика, инженера-металлурга, блестящего экспериментатора, способного задумать и своими руками реализовать сложнейшие полномасштабные опыты, но и его замечательные человеческие качества — трудолюбие, самоотверженность, целеустремлённость, любовь и уважение к товарищам по делу. И, конечно, коллектив отвечает ему взаимностью.

Будучи творческим участником всех основных разработок в области электрошлаковых технологий Института электросварки в течение последних 47 лет, он является ещё и непосредственным разработчиком и «внедренцем» в производство уникального опыта электрошлаковой сварки заготовок сверхбольших сечений с применением кусковых присадочных материалов для ковано-сварных заготовок массой более 100 тонн, например роторов и валков для толстолистовых станов «4599» и «5000».

Н. Т. Шевченко хорошо известен не только в СНГ, но и во многих зарубежных организациях и фирмах как высококлассный специалист и пропагандист новейших технологических разработок Института электросварки им. Е. О. Патона.

От всей души поздравляем юбиляра, желаем ему крепкого здоровья, долголетия и дальнейших творческих успехов.

*Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины*

*Редколегия журнала*

*«Современная электрометаллургия»*





## Памяти Арсенюка Валерия Васильевича



**20 мая 2008 года** на 62-м году трагически ушел из жизни ведущий научный сотрудник Института электросварки им. Е. О. Патона, доктор технических наук, профессор, Управляющий делами Национальной академии наук Украины Валерий Васильевич Арсенюк.

С 1971 года его трудовая деятельность неразрывно связана с Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, где он прошел славный путь от инженера до заместителя генерального директора.

Научной общественности известны работы Валерия Васильевича, посвященные изучению механизма пластической деформации и формирования структуры при различных способах сварки давлением разнородных металлов, а также особенностей фазового состава и технологиям получения сварных соединений ме-

таллов с ограниченной взаимной растворимостью. Комплекс научных работ, выполненных при непосредственном участии В. В. Арсенюка, дал возможность разработать новую методику подхода к оценке механических свойств сварных соединений разнородных металлов, основанную на анализе вклада конкретных структурных и фазовых составляющих в уровень прочности и пластичности, позволил выбрать оптимальный способ сварки, при котором исключается возможность образования хрупких фаз в зоне соединения; установить влияние скорости деформации на коэффициент массопереноса легирующих составляющих свариваемых материалов и характер пластической деформации, а также разработать научные основы технологии сварки давлением, широко используемые при оптимизации технологических процессов диффузионной и магнитно-импульсной сварки, сварки трением и взрывом, ударной сварки в вакууме и получении биметаллов способом горячей прокатки.

На протяжении многих лет В. В. Арсенюк проводил большую организационную работу на посту заместителя директора Института электросварки им. Е. О. Патона, а с 1996 года — на посту Управляющего делами Национальной академии наук Украины.

Долгое время он преподавал в Автотранспортном университете (г. Киев), а последние годы — в Приазовском государственном техническом университете (г. Мариуполь), где был членом спецсовета по защите докторских диссертаций. В. В. Арсенюк — автор более 70 научных публикаций, среди которых методические и учебные пособия.

Валерий Васильевич своей научной и организационной деятельностью снискал большое уважение и авторитет не только среди сотрудников Института электросварки, но и всех институтов и учреждений Национальной академии наук Украины.

Ушел из жизни замечательный человек, добрый и отзывчивый товарищ, прекрасный семьянин.

Валерий Васильевич любил жизнь, любил людей и старался помогать всем, кто к нему обращался.

Он навсегда останется в сердцах друзей и коллег по работе.

*Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины  
Редколлегия журнала  
«Современная электрометаллургия»*

## Памяти академика В. К. Лебедева



С глубокой печалью извещаем, что 23 мая на 86-м г. жизни после продолжительной тяжелой болезни ушел из жизни Владимир Константинович Лебедев — выдающийся ученый в области электротермии и электросварки, академик Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины, лауреат Ленинской премии, Государственной премии СССР и двух государственных премий Украины, Премии им. Е. О. Патона НАН Украины.

В. К. Лебедев родился в июне 1922 г. в Данкове Липецкой обл. После окончания в 1944 г. Московского энергетического института с 1945 г. и до последних дней жизни работал в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, был заведующим отделом, первым заместителем директора, советником дирекции.

Творческая деятельность ученого характеризовалась чрезвычайно широким диапазоном научно-технических интересов и глубокой заинтересованностью



практическим применением результатов исследований и разработок. Его работы хорошо известны не только в Украине, но и за ее пределами.

Наиболее значимые достижения академика В. К. Лебедева касаются исследований средств преобразования электрической энергии в тепловую и создания десятков типов новых источников питания для разнообразных видов дуговой, электрошлаковой, контактной, электронно-лучевой, лазерной сварки и специальной электрометаллургии. Все источники питания нашли широкое применение во многих областях промышленности, трубопроводного и железнодорожного транспорта, в производстве силовых элементов летательных аппаратов. В последние годы В. К. Лебедев был ведущим разработчиком выполняемого под руководством академика Б. Е. Патона и при участии большой группы специалистов медицинского профиля амбициозного проекта «Сварка живых тканей». Его разработки теоретических основ этого процесса на молекулярном уровне и основ автоматической самонастройки получения качественного соединения позволили впервые в мире создать сварочное медицинское оборудование и инструменты для проведения хирургических операций по восстановлению физиологических функций поврежденных органов человека, которые нашли успешное клиническое применение.

Многие годы В. К. Лебедев активно занимался научно-организационной и общественной деятельностью. Он являлся заместителем главного редактора журнала «Автоматическая сварка», заместителем председателя специализированного совета по защите кандидатских и докторских диссертаций, председателем Украинского аттестационного комитета сварщиков.

Академику В. К. Лебедеву принадлежит авторство около 500 научных работ, в том числе 11 монографий, свыше 200 изобретений, большинство из которых защищены отечественными и иностранными патентами. Под его научным руководством успешно подготовлено 10 докторов и более 40 кандидатов технических наук.

Многолетняя творческая работа академика В. К. Лебедева отмечена высокими государственными наградами.

Владимир Константинович был высокоинтеллигентным, глубоко порядочным, доброжелательным человеком, которого искренне уважали и любили коллеги и друзья, все, кто знал его в работе и быту.

Уход Владимира Константиновича Лебедева — тяжелая и непоправимая потеря для науки и техники. Светлая память об этом Человеке всегда будет в наших сердцах.

*Национальная академия наук Украины  
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины  
Редколлегия журнала  
«Современная электрометаллургия»*