Международный научно-теоретический и производственный журнал

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ

№ 3 (96)
2009

Издается с января 1985 г.

Учредители: *Национальная академия наук Украины*
Институт электросварки им. Е. О. Патона
Международная ассоциация «Сварка»

Издатель: *Международная ассоциация «Сварка»*

Выходит 4 раза в год

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, Л. Б. Медовар,
Б. А. Мовчан, А. Н. Петрунько,
А. С. Письменный, Н. П. Тригуб,
А. А. Троянский, А. И. Устинов,
В. А. Шаповалов

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Институту электросварки — 75! Состояние и перспективы развития специальной электрометаллургии 3

ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Цыкуленко А. К., Федоровский Б. Б., Смолярко В. Б., Загоровский П. И., Медовар Л. Б., Рябинин В. А., Журавель В. М., Ярош В. М. Проблемы разливки жидкой стали с малой скоростью 9

Полещук М. А., Шевцов В. Л., Пузрин Л. Г., Круцан А. М., Радкевич А. И., Чучман М. Р. Выбор способа изготовления литых электрошлаковых корпусов фланцевых задвижек высокого давления в коррозионно-стойком исполнении 15

Истомин С. А., Рябов В. В., Пастухов Э. А. Электрохимическое восстановление ванадия и ниобия из оксидно-фторидных расплавов при электрошлаковом переплаве 19

Медовар Л. Б., Саенко В. Я., Рябинин В. А. Получение расходуемых электродов из титановой губки для производства слитков способами ЭШП и ДШП 23

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Курапов Ю. А., Дидикин Г. Г., Романенко С. М., Литвин С. Е. Наночастицы магнетита, полученные способом конденсации молекулярных пучков в вакууме 26

Березос В. А., Ерохин А. Г. Рафинирование кремния способом электронно-лучевой плавки 29

ВАКУУМНО-ИНДУКЦИОННАЯ ПЛАВКА

Шаповалов В. А., Шейко И. В., Никитенко Ю. А. Получение быстрозакаленных сплавов способом диспергирования при ИПСК 32

Егоров С. Г., Червоный И. Ф., Воляр Р. Н. Математическая модель влияния поля индуктора на коэффициент распределения примеси в кремнии 36

ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ПЕРЕПЛАВ

Демчишин А. В., Миченко В. А., Автономов Г. А., Токарев О. А. Модифицированная вакуумно-дуговая установка «Булат-3Т» 40

ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Шаповалов В. А., Бурнашев В. Р., Биктагиров Ф. К., Украинец А. И., Брагин М. А., Пудиков В. Н., Константинов В. С., Степаненко В. В., Пешков А. Н. Переработка стружки жаропрочной стали ЭП609-Ш способом компактирования под электрическим током с последующим электрошлаковым переплавом 43

ИНФОРМАЦИЯ

Иванова Н. Л. 11-я Международная научно-практическая конференция в Санкт-Петербурге 46

Коваленко В. С., Зельниченко А. Т. 4-я Международная конференция по лазерным технологиям 47

Войнарович С. Г., Хаскин В. Ю. День науки в ИЭС им. Е. О. Патона 49

Аснис Е. А., Шулым В. Ф., Пискун Н. В., Статкевич И. И. К 25-летию сварки в открытом космосе 50

Международная компания «АНТАРЕС» 52

К 80-летию со дня рождения и 55-летию научной и педагогической деятельности Михаила Ивановича Гасика 53

А. К. Цыкуленко — 70 55

К 70-летию Г. М. Григоренко 56

Правила оформления рукописей для журнала «Современная электрометаллургия» 57

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ

ГП «Научно-производственный центр «ТИТАН»
КП «Запорожский титано-магниевый комбинат»
ООО «Международная компания «АНТАРЕС»
Научно-производственное предприятие «ЭЛТЕХМАШ»

© НАН Украины, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, МА «Сварка», 2009

International Scientific-Theoretical and Production Journal

SOVREMENNAYA ELEKTROMETALLURGIYA

(Electrometallurgy Today)

№ 3 (96)
2009

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,
L. B. Medovar, B. A. Movchan,
A. N. Petrunko, A. S. Pismenny,
N. P. Trigub, A. A. Troyansky,
A. I. Ustinov, V. A. Shapovalov

THE INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL:

D. Ablitzer (France)
G. M. Grigorenko (Ukraine)
A. A. Iljin (Russia)
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
ttp://www.nas.gov.ua/pwj

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

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

The E.O.Paton Electric Welding Institute is 75! State-of-the-art and prospects of development of special electrometallurgy 3

ELECTROSLAG TECHNOLOGY

Tsykulenko A. K., Fedorovsky B. B., SmolyarkoV. B., Zagorovsky P. I., Medovar L. B.,Ryabinin V. A., Zhuravel V. M., Yarosh V. M. Problems of molten steel pouring at a low speed 9

Poleshchuk M. A., Shevtsov V. L., Puzrin L. G., Krutsan A. M., Radkevich A. I., Chuchman M. R. Selection of method of manufacture of electroslag cast bodies of flange high-pressure stop valves in a corrosion-resistant variant 15

Istomin S. A., Ryabov V. V., Pastukhov E. A. Electrochemical recovery of vanadium and niobium from oxide-fluoride melts during electroslag remelting 19

Medovar L. B., Saenko V. Ya., Ryabinin V. A. Manufacture of consumable electrodes from spongy titanium for producing ingots using ESR and ASR methods 23

ELECTRON BEAM PROCESSES

Kurapov Yu. A., Didikin G. G., Romanenko S. M., Litvin S. E. Nanoparticles of magnetite produced by the method of condensation of molecular beams in vacuum 26

Berezos V. A., Erokhin A. G. Refining of silicon using the method of electron beam melting 29

VACUUM-INDUCTION MELTING

Shapovalov V. A., Sheiko I. V., Nikitenko Yu. A. Producing of rapidly hardened alloys by the method of dispersion during induction melting in a sectional mould 32

Egorov S. G., Chervonyi I. F., Volyar R. N. Mathematical model of inductor field effect on coefficient of impurity distribution in silicon 36

VACUUM-ARC REMELTING

Demchishin A. V., Michenko V. A., Avtonomov G. A., Tokarev O. A. Modified vacuum-arc installation «Bulat-3T» 40

ENERGY AND RESOURCES SAVING

Shapovalov V. A., Burnashev V. R., Biktagirov F. K., Ukrainets A. I., Bragin M. A., Pudikov B. N., Konstantinov V. S., Stepanenko V. V., Peshkov A. N. Recycling of chips of heat-resistant steel EP609-Sh using the method of compacting at electric current with subsequent electroslag remelting 43

INFORMATION

Ivanova N. L. 11th International Scientific-Practical Conference in St.-Petersburg 46

Kovalenko V. S., Zelnichenko A. T. 4th International Conference on laser technologies 47

Voynarovich S. G., Haskin V. Yu. Day of Science at the E. O. Paton Electric Welding Institute 49

Asnis E. A., Shulym V. F., Piskun N. V., Statkevich I. I. Towards the 25th anniversary of welding in open space 50

International company «ANTARES» 52

Towards the 80th birthday and 55th anniversary of scientific and pedagogical activity of Gasik M. G. 53

A. K.Tsykulenko is 70 55

G. M. Grigorenko is 70 56

Rules of manuscripts preparation for journal «Sovremennaya Elektrometallurgiya» 57

«Sovremennaya Elektrometallurgiya» journal is published in English under the title of ***«Advances in Electrometallurgy»*** *by Camdridge International Science Publishing*

© NAS of Ukraine, The E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, International Association «Welding», 2009

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУГИИ

За 75 лет, прошедших со дня основания Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, создано множество новейших технологических процессов и образцов уникального оборудования для их реализации. Многие из них были первыми в мировой практике, надежно служат и сегодня прогрессу и на Земле, и под водой, и в космическом пространстве.

Прежде всего это касается различных видов сварочных процессов и оборудования, всего, что связано с ними, качества сварных швов и сварных соединении, прочности и надежности сварных конструкций, методов их диагностики и многого другого.

Борису Евгеньевичу Патону принадлежит особая роль в возникновении, становлении и развитии специальной электрометаллургии (СЭМ) — важнейшей для технического прогресса отрасли промышленности. Именно Б. Е. Патоном впервые в мире предложена идея использования сварочных источников нагрева (электрошлаковой ванны, дуговой плазмы, электронного луча) для переплавных процессов различных металлов и сплавов и придания им особо высокого качества и надежности.

К новым процессам СЭМ в первую очередь относится электрошлаковый переплав (ЭШП) расходуемого электрода в водоохлаждаемую изложницу. Фундаментальные исследования сущности ЭШП, его физико-химических, металлургических и электротехнических особенностей, выполненные в Институте электросварки в середине 1950-х – начале 1960-х обеспечили на то время институту передовые позиции в области разработки и применения электрошлаковой технологии, литья, подпитки и др.

В очень короткие сроки электрошлаковый переплав был внедрен в промышленность. В мае 1958 г. на заводе «Днепрспецсталь» (ДСС) вступила в строй первая в мире промышленная печь ЭШП Р-909, спроектированная и изготовленная в Институте электросварки. Первой промышленной продукцией печей ЭШП здесь стала шарикоподшипниковая сталь ШХ-15, а ее первым потребителем — флагман советской подшипниковой промышленности 1-й Государственный подшипниковый завод в Москве. Затем к нему присоединился Запорожский моторный завод (головной в составе нынешнего ОАО «Мотор-Сич»).

В тот же период институтом совместно с НКМЗ спроектирована и изготовлена первая в истории ЭШП промышленная трехфазная печь ЭШП-2, предназначенная для выплавки стальных двухтонных кузнечных слитков. Печь введена в эксплуатацию на НКМЗ в 1958 г. На ней был освоен выпуск крупных кузнечных слитков массой до 2 т из 12%-й хромистой жаропрочной стали для дисков судовых газовых турбин. С этого момента началась эра промышленного использования ЭШП в бывшем СССР и в мире. Работа удостоена Ленинской премии за 1963 г.

Первой из стран Запада, проявивших деловой интерес к ЭШП, стала Франция. После посещения французскими представителями Института электросварки им. Е. О. Патона и завода «Днепроспецсталь» летом 1963 г. две фирмы (металлургическая «Компани дез ателье э форж де ла Луар» (КАФЛ) и электромашиностроительная «Компани электромеканик» (КЭМ) приобрели советскую лицензию на способ ЭШП и оборудование для его реализации.

Летом 1965 г. на заводе фирмы «КАФЛ» в г. Фермини, близ г. Сент-Этьена, введена в эксплуатацию первая в Западной Европе электрошлаковая печь (типа Р-951). Именно на этой печи впервые успешно освоен ЭШП шарикоподшипниковых, быстрорежущих, нержавеющих сталей и сплавов типа инконель. Через год заработала печь ЭШП в Шеффилде (Англия). Здесь было начато серийное производство печей ЭШП. В 1970 г. по советской лицензии запустили первую печь на фирме «Авеста» (Швеция), а в 1972–1974 гг. — ряд печей ЭШП в Японии.

В США в конце 1960-х гг. опубликована американская программа исследований в области ЭШП и поставлена задача догнать русских. Об успехах американцев, купивших в мае 1969 г. первую советскую лицензию на ЭШП, свидетельствует тот факт, что спустя 8 лет в США годовое производство электрошлакового металла в слитках достигло 126 тыс. т. Большинство печей ЭШП, работающих в США, построено американской фирмой «Консарк корпорейшн», ранее специализирующейся на производстве только печей ВДП.

Электрошлаковый переплав в бывшем СССР развивался стремительно, поскольку главными потребителями металла особо высокого качества стали производители вооружения и различной военной техники: военно-морского судостроения, танкостроения и др. В 1980-х гг. построены прекрасно оснащенные уникальные цехи ЭШП на НКМЗ (Краматорск), МК «Азовсталь» (г. Мариуполь), заводе «Красный Октябрь» (г. Волгоград).

Развитию ЭШП способствовала система прямой государственной поддержки ученых и специалистов, плодотворно трудившихся не только в Институте электросварки им. Е. О. Патона, но и во ВНИИЭТО, ЦНИИ «Прометей», ЦНИИЧермет, ВИАМ, ВИЛС, НИИХИМаш и др. Важен и тот факт, что изобретения, связанные с новыми технологическими процессами ЭШП и с оборудованием для их осуществления, запатентованы во многих странах мира (Франции, Японии, Швеции, США и др.), причем только Институт электросварки имеет более 600 зарубежных патентов в этой области.

Большие возможности для коренного улучшения структуры заготовительного производства машиностроения в середине 1970-х гг. открылись благодаря разработке в институте под руководством Б. Е. Патона разновидности электрошлаковой технологии — электрошлакового литья (ЭШЛ), которое на заводах тяжелого машиностроения позволяет полностью отказаться от ковки литого электрошлакового металла и при этом объединить в машиностроительной заготовке оптимальную форму отливки и высокие механические свойства поковки. Примечательно, что высокое качество металла электрошлаковой отливки сочетается в ЭШЛ с чрезвычайно высоким выходом годного, достигающим 85… 95 %, и полной ликвидацией брака в заготовительном производстве. Работа удостоена Государственной премии Украины за 1978 г.

В тяжелом и металлургическом машиностроении ЭШЛ нашло применение при изготовлении заготовок для горячей и холодной штамповки, цапф и подцапфовых плит к крупнотоннажным сталеразливочным ковшам, валков горячей и холодной прокатки труб, крупных коленчатых валов судовых дизелей, деталей промышленных тракторов, листосварных баллонов высокого давления.

В конце 1960-х – середине 1970-х гг. в Институте электросварки им. Е. О. Патона совместно с ПО «Ждановтяжмаш» (теперь ОАО «Азовмаш») разработана технология производства литосварных сосудов высокого давления, используемых для работы на повышенных параметрах. В начале 1980-х гг. там же создано специализированное оборудование, разработана и освоена технология ЭШЛ полых цилиндрических заготовок, днищ, патрубков и других деталей из аустенитной стали, а также организовано производство литосварных сосудов, предназначенных для работы в условиях сверхнизких температур и высоких давлений.

Основное назначение ЭШЛ и его разновидностей (центробежного ЭШЛ и электрошлакового кокильного литья) состоит не только в замене таких традиционных технологических процессов, как литье и ковка. Его следует рассматривать в качестве одного из высокоэффективных и металлосберегающих способов заготовительного производства, позволяющего расширить выпуск заготовок и другой продукции с минимальной механической обработкой.

Одним из наиболее ярких примеров эффективного применения ЭШЛ является разработка и внедрение электрошлаковой технологии изготовления заготовок вварных бандажей цементных печей на заводе «Волгоцеммаш» (г. Тольятти). Данную работу проводили по инициативе Б. Е. Патона, который предложил оригинальную схему ЭШЛ заготовок вварного бандажа цементной печи наружным диаметром 6 м, толщиной 500 мм и массой 33 г. Технология ЭШЛ, разработанная в институте совместно с заводом «Волгоцеммаш», позволила решить проблему получения высококачественных стальных заготовок вварных бандажей обжиговых цементных печей, максимально приближающихся по форме и размерам к конечному изделию, что позволило уменьшить металлоемкость цементной печи на 147 т. Кроме того, значительно повысилась работоспособность, а в результате — производительность печи.

В начале 1970-х гг. в институте под руководством Б. Е. Патона разработан новый способ переплава металлического расходуемого электрода электрической дугой, горящей между торцом расходуемого электрода и поверхностью жидкой шлаковой ванны, в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе, получивший название дугошлакового переплава (ДШП). По сравнению с ЭШП, способ ДШП при выплавке слитков позволяет в 1,5 раза уменьшить расход электроэнергии, а также почти в 2 раза сократить расход синтетического флюса на 1 т металла. По качеству металл ДШП практически не уступает металлу ЭШП. Главным достоинством ДШП является возможность легировать металлы азотом из газовой фазы, в том числе под давлением, при полном исключении из технологического процесса производства высокоазотистых сталей и сплавов дорогостоящих азотсодержащих соединений, например нитрида кремния.

В результате проведенных в 1990-е гг. опытно-промышленных работ показано, что ДШП может быть эффективен при производстве титана и его сплавов и позволяет получать крупные листовые слитки (массой 5 т) с хорошей поверхностью и высокого качества.

В последние годы благодаря разработке в Институте электросварки нового технологического процесса электрошлаковой наплавки жидким металлом (ЭШН ЖМ), новой технологической схемы ЭШП с двумя источниками питания (ЭШП ДС) и использованием токоподводящего кристаллизатора открылись новые возможности для совершенствования технологии получения биметаллических заготовок и изделий различного назначения, таких как композитные заготовки валков прокатных станов, биметаллическая арматура, подовые сталемедные электроды дуговых печей и др.

Безусловным преимуществом процесса ЭШН ЖМ является возможность наплавки материалами самого различного химического состава (нержавеющими, инструментальными и быстрорежущими сталями, жаропрочными никелевыми сплавами и др.). При этом высокого качества биметаллических заготовок

достигают при их значительно более низкой стоимости, чем при ЭШН с применением расходуемых электродов.

В рамках совместных работ с ЗАО «НКМЗ» выполнен проект соответствующей адаптации печи ЭШП и создан первый в мире промышленный агрегат для производства способом ЭШН ЖМ композитных заготовок прокатных валков диаметром до 1000 м, длиной наплавляемой бочки до 2500 мм и массой до 25 т, накоплен значительный опыт изготовления композитных заготовок с высокохромистым наплавленным рабочим слоем. Применение таких валков показало, что их стойкость в 2… 3 раза выше, по сравнению с серийными чугунными валками, использовавшимися ранее. Технология ЭШН ЖМ реализована также при изготовлении биметаллических заготовок диаметром 35 мм с коррозионно-стойкой наплавкой из аустенитной стали типа 316L и основным слоем из стали 20ГС для биметаллического арматурного профиля.

Сегодня ЭШП наряду с ВДП, ПДП, ЭЛП является основой специальной электрометаллургии. По разным оценкам, в мире выплавляют около 1,5 млн т металла ЭШП ежегодно, при этом около половины — в Китае. Ныне ЭШП — это стандартный, хорошо изученный металлургический процесс, однако перед металлургами ЭШП стоят новые сверхсложные задачи — прежде всего получение высококачественных гигантских сплошных и полых стальных слитков массой до 300 т и более (возможно), а также на порядок меньшей массы слитков жаропрочных сплавов. Казалось бы, что эти задачи известны и более или менее удачно решены почти 30 лет назад, в частности для нужд энергетики. Однако сейчас они значительно усложнились. Их предстоит решить для нового поколения сталей и сплавов.

Не менее сложную задачу предстоит решить применительно к изготовлению литых полых заготовок ЭШЛ диаметром 4… .5 м для толстостенных сосудов ответственного назначения, в т.ч. для атомной энергетики и нефтехимии.

Электронно-лучевой переплав (ЭЛП) — один из наиболее эффективных способов повышения служебных характеристик металлов и сплавов, прежде всего при получении особо чистых тугоплавких металлов (ниобия, тантала, циркония, молибдена и др.). Благодаря высокой степени рафинирования и формированию более однородных по химическому составу и структуре слитков существенно повышаются физико-механические свойства металлов и сплавов, увеличивается их технологическая пластичность.

В отличие от ВДП, к расходуемой заготовке для ЭЛП предъявляются минимальные требования, что позволяет уменьшить расход металла. Одновременно достигают значительного сокращения трудовых (количество операций по переделу) и энергетических затрат.

Первую отечественную промышленную установку ЭЛП разработали и создали в ИЭС, а внедрили на Донецком химико-металлургическом заводе. На Артемовском заводе наладили выпуск холоднокатаного листа ниобия и тантала электронно-лучевой выплавки. Разработаны технологии переплава ванадия, циркония, меди для электронной промышленности.

Получили развитие способы ЭЛП с применением промежуточной емкости и способ выплавки плоских слитков в горизонтальном кристаллизаторе. ЭЛП позволяет получать не только особо чистые металлы, но и сплавы с особыми функциональными свойствами. Для электротехнической и аэрокосмической промышленности в конце в 1960–1970-х гг. в ИЭС разработан ряд оригинальных сплавов на основе никеля, ниобия, молибдена с повышенной низкотемпературной пластичностью. Особое место в электронно-лучевых технологиях занимает производство слитков из титана и его сплавов.

Научный и практический подход Б.Е. Патона к решению реальных технических задач для нужд отечественной промышленности позволил в короткий срок разработать технологию, изготовить оборудование для электронно-лучевой плавки, а также создать научно-производственный центр «Титан» с минизаводом вакуумной металлургии производительностью до 3000 т титановых сплавов в год.

Разработаны новые отечественные сплавы из титана с более высоким уровнем механических и эксплуатационных свойств, чем существующие в мировой практике, для использования в медицине, химическом машиностроении, автомобилестроении, в авиационной и военной технике (сплавы Т80 и Т90, заменяющие соответственно сплавы ОТ4-1 и ОТ4 и превосходящие их по уровню свойств и свариваемости, сплавы ТЮО, превосходящие по механическим свойствам широко известный сплав титана ВТ6 (Grade5), и Т-110, который по технологичности, свариваемости и работоспособности в условиях циклических нагрузок превышает широко используемый в авиации сплав ВТ22).

Первый отечественный высокопрочный сплав Т-110 предназначен для использования в самолетостроении (например, лайнерах АН70 и АН148). Для дальнейшего снижения себестоимости и трудоемкости изготовления слитков титана из первичного сырья в ИЭС им. Е. О. Патона впервые в мире разработана технология электронно-лучевого переплава с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) недробленых блоков губчатого титана массой 0,7…3,8 т, что позволяет исключить из технологического цикла производства слитков не только этап прессования расходуемого электрода для последующего переплава, но и операцию дробления блоков губчатого титана.

Предложенная технология ЭЛПЕ блоков губчатого титана обеспечивает повышение на 20 % технико-экономических показателей, в сравнении с ЭЛПЕ дробленого губчатого титана. Для реализации данного способа в ИЭС им. Е.О. Патона в 2004 г. создали не имеющую аналогов электронно-лучевую установку

УЭ5810, позволяющую совместить процессы оплавления боковой поверхности блока на этапе предварительного подогрева и плавки в одной вакуумной камере. Использование указанной технологии в условиях промышленных предприятий позволило организовать в Украине конкурентоспособное на мировых рынках производство высококачественных слитков и слитков-слябов титана.Для сокращения потерь металла в ИЭС им. Е. О. Патона впервые в мире предложена, вместо механической обработки, технология оплавления электронным лучом боковой поверхности слитков как круглого, так и квадратного сечений, а также слитков-слябов, создано соответствующее оборудование. Разработка удостоена Государственной премии Украины за 2006 г.

Оплавление таких слитков осуществляется за счет нагрева и расплавления поверхностного слоя слитка электронным лучом вдоль его образующей одновременно по всей длине. У круглых слитков ванна жидкого металла перемещается по поверхности слитка благодаря его вращению вокруг своей оси, а у слитков квадратного сечения и слитков-слябов — с управлением развертками электронного луча.

Процесс электронно-лучевого оплавления поверхностного слоя слитков характеризуется высокой плотностью подводимой энергии, легкостью контроля и управления технологическими параметрами, а также экономией до 15 % металла, в зависимости от массы оплавляемого слитка.

Впервые в мировой практике предложены технология получения горячекатаных труб непосредственно из литых трубных заготовок (успешно внедрена на Никопольском Южно-трубном заводе в 1998–2000 гг.), а также технология производства полых слитков для изготовления крупногабаритных титановых труб и колец из отечественных титановых сплавов.

Идея плазменно-дугового переплава (ПДП) металлов и сплавов в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе полностью принадлежит Б.Е. Патону. Он предложил заняться разработкой этого процесса в самом начале 1960-х гг. К тому времени в ИЭС им. Е.О. Патона уже были разработаны ЭШП и ЭЛП. Начав заниматься ПДП, институт тем самым замыкал все три физически возможных случая взаимодействия с жидким металлом второй фазы — шлака, вакуума и газов — в различных вариантах.

Работы в области плазменного переплава развивались значительно быстрее, чем у двух других способов вторичного передела. Это объясняется тем, что они основывались на опыте, накопленном при разработке ЭШП и ЭЛП. Уже в 1966 г. на Свердловском заводе ОЦМ введена в эксплуатацию первая в мире промышленная печь для переплава сплавов на основе платины и палладия, используемых при производстве стекловолокна, потенциометрических сплавов, приборов слепой посадки самолетов и, наконец, производстве микрочипов.

На этом заводе впервые в мире были получены чистые иридий и осмий в плавленом состоянии. До этого их производили только в виде спеченных брикетов. Этому успеху способствовало то, что слитки драгоценных металлов малогабаритны, и указанному заводу полностью подошла печь на слиток диаметром всего лишь в 100 мм. Через год на Ижевском металлургическом заводе вошла в строй плазменно-дуговая печь на слиток диаметром 150 мм, металл которой с успехом использовался для изготовления некоторых деталей всемирно известной автоматической винтовки конструкции Калашникова.

В 1967 г. на электрометаллургическом заводе в г. Электросталь запущена плазменно-дуговая печь новой конструкции для производства специальных сталей и сплавов. На ней выплавляли слитки массой 0,5 т и больше. Далее последовали печи не только для переплава прецизионных сплавов, но и для производства слитков компактного химически чистого титана из губчатого металла (Запорожский титано-магниевый комбинат), а также слитков титановых сплавов различного назначения.

Б. Е. Патон предложил применить плазменную плавку для переработки отходов титана. В короткие сроки в лабораториях ИЭС им. Е. О. Патона проведены исследования процесса плазменной плавки из листовых отходов, стружки и отходов губчатого титана. Руководство Министерства цветной металлургии обратилось к Борису Евгеньевичу с просьбой о создании промышленных печей для этих целей. Такие печи были спроектированы, изготовлены и совместно с Алчевским металлургическим комбинатом и Запорожским титано-магниевым комбинатом сданы в эксплуатацию в 1972 г. и 1979 г.

На Алчевском металлургическом комбинате впервые в мире способом плазменной плавки получены плоские слитки размером 800×120×1300 мм из 100 % листовых отходов титана. После прокатки слитков из листа изготовляли химическое оборудование, успешно эксплуатируемое на предприятиях химического комплекса.Плазменная двухручьевая печь УП-100, установленная на Запорожском титано-магниевом комбинате, позволяет выплавлять из отходов губчатого титана одновременно два слитка диаметром до 300 мм и длиной 2500 мм, а также два плоских слитка размерами 400×200×2500 мм. Уникальность печи заключается в том, что она дает возможность выплавлять как одновременно два слитка, так и попеременно по одному слитку с переливом из одного кристаллизатора в другой.

Слитки использовали в качестве расходуемых электродов в вакуумно-дуговых литейных печах для получения литых изделий.

Тысячи единиц запорной титановой арматуры установлены на предприятиях химической промышленности во многих странах СНГ. Серьезную проблему представляла рациональная переработка отходов титана, накапливавшихся на авиационных и моторостроительных заводах. На Запорожском моторном

заводе (ОАО «Мотор-Сич») существующая промышленная печь ВДЛ-4 была оснащена разработанным в ИЭС им. Е. О. Патона нерасходуемым электродом с рабочим током до 20 кА для получения отливок ответственного назначения из 100 % отходов литья.

Мощность плазменно-дуговых печей постоянно росла и достигла выплавки 3,5-тонного слитка на Ижевском металлургическом заводе. В короткие сроки с помощью плазменно-дуговых печей решен ряд крупных экономических задач, в частности, для производства высокопрочных канатов для сверхглубоких шахт (Ижевский металлургический завод); внесен существенный вклад в решение проблемы вторичного титана; получена биметаллическая сверхтонкая лента для магнитной записи программ спутников Земли, работающих на орбите в длительном автоматическом режиме (Ленинградский сталепрокатный завод) и др.

Поскольку в 1960-х – 1970-х гг. мощности электропечестроения в СССР были развиты слабо, для скорейшего распространения плазменно-дугового переплава академик Б. Е. Патон предложил собственную идею, которая заключалась в том, чтобы осуществлять процесс ПДП в корпусе вакуумно-дуговой печи. Этот новый вариант плазменно-дугового переплава получил название переплава расходуемого плазмотрона (ПРП).

Суть предложенного способа переплава состояла в том, что для переплава вместо сплошного расходуемого электрода использовали расходуемый электрод с осевым отверстием (полый электрод), через которое в процессе плавки в зону дуги подается плазмообразующий газ. Состав газа можно варьировать в зависимости от требований технологии, т. е. это может быть инертный газ либо газовые смеси, в состав которых наряду с инертными входят, например азот или водород, взаимодействующие с жидким металлом.

Эта идея базировалась на прекрасном знании процесса вакуумно-дугового переплава и на использовании физического явления так называемого эффекта полого катода. При определенных параметрах электрического режима внутренняя поверхность электрода может одновременно выполнять роль катода и стенок сопла плазмотрона. В результате дуговой разряд по своим физическим характеристикам переходит в плазменный.

Переплав расходуемого плазмотрона впервые осуществлен в промышленных масштабах на электрометаллургическим заводе «Днепроспецсталь» (г. Запорожье) в 1973 г. Выплавлены слитки диаметром 320 мм (массой до 1 т) из высокопрочной и жаропрочной азотсодержащей стали. Параллельно с увеличением мощности плазменных печей происходило совершенствование и наращивание единичной мощности дуговых металлургических плазмотронов.

Первые плазменно-дуговые печи были оснащены дуговыми плазмотронами постоянного тока, способными в течение продолжительного времени (до 50 ч) работать на токе до 500 А. В дальнейшем на основании широких исследований создали ряд дуговых металлургических плазмотронов серии ПДМ, способных работать длительное время (достаточное для ведения одной плавки) на токах 5…6 кА.

Переломным этапом в создании мощных металлургических плазмотронов явился переход на принципиально новый способ повышения стойкости электродов — применение плазменных катодов и создание трехфазных плазменно-дуговых комплексов переменного тока. Работы, связанные с созданием и исследованием мощных металлургических плазмотронов постоянного и переменного тока с плазменным электродом, проводились по инициативе Б. Е. Патона. Такие плазмотроны мощностью до 2 МВт и с большим ресурсом получили признание во многих промышленно развитых странах и защищены патентами США, Англии, Германии, Франции, Японии и других стран. Созданные на их основе плазменные нагревательные комплексы переменного тока (трехфазная группа плазмотронов и источники питания к ним) мощностью до 5 МВт закуплены и успешно освоены фирмами «Крупп» (Германия), «Ниппон стил» (Япония) и ОАО «Буммаш» (Россия).

Особого внимания заслуживают работы, посвященные плазменно-дуговым комплексам, поскольку в металлургии они оказались наиболее приемлемыми как по технически более простому оснащению, так и по технологическим возможностям. Такими комплексами могут оснащаться дуговые сталеплавильные печи. В этом случае плазменно-дуговой комплекс используется вместо графитовых электродов. Трехфазные комплексы дуговых плазмотронов находят широкое применение при создании переплавных печей с формированием слитка в охлаждаемом медном кристаллизаторе (печи УП100, У600), их можно также применять для интенсификации плавки в индукционных печах открытого типа или вакуумных (комплекс ПДТУ-300).

Одним из направлений в развитии прогрессивных плазменных технологий стала плазменная внепечная обработка стали. Применение плазменных источников тепла в этом процессе позволило избежать недостатков, присущих ковш-печам с дуговым нагревом, а также достичь более высокого качества стали. Данными разработками заинтересовалась японская фирма «Ниппон стил». В 1988 г. на этой фирме в технологической цепочке домна–конвертер–плазменная внепечная обработка стали–машина непрерывного литья был введен в эксплуатацию 100-тонный ковш-печь, оборудованный плазменным нагревательным комплексом ИЭС им. Е. О. Патона мощностью до 5 МВт.

В 1996 г. на ОАО «Буммаш» (г. Ижевск) успешно ввели в эксплуатацию ковш-печь вместимостью до 30 т, оснащенный плазменным нагревательным комплексом ИЭС им. Е. О. Патона мощностью до 4 МВт. Скорость нагрева стали в ковше-печи достигает 4… 15 °С/мин.

В 1975 г. Б. Е. Патон предложил коренным образом изменить способы обработки поверхности слитков перед деформацией, основанные на использовании плазменных источников нагрева. Так, в ИЭС им. Е. О. Патона появилось новое направление — плазменно-дуговое рафинирование поверхности (ПДРП), безотходный способ устранения поверхностных дефектов. Освоению данной технологии предшествовал большой объем физико-химических и технологических исследований, включивший изучение теплообмена, газодинамического давления плазмы на металл, локального взаимодействия металла с газом в пятне нагрева и т. д.

Указанные исследования были необходимы для управления глубиной проплавления поверхностного слоя, размерами ванны, а также предотвращения слива металла с цилиндрической поверхности вращающегося слитка с учетом особенностей ПДП поверхностного слоя заготовок из металлов с высокой теплопроводностью. Конструкторско-технологические работы выполнялись совместно с организациями Минчермета, Минцветмета и Минавиапрома СССР.

На заводах «Электросталь», ВСМПО (Россия) и «Днепроспецсталь» (Украина) создали специализированные участки, оснащенные многоплазмотронными высокопроизводительными агрегатами ПДРП, предназначенными для обработки плоских заготовок и цилиндрических слитков диаметром до 800 мм и длиной до 3 м. Область их применения охватывает жаропрочные дисперсионно-твердеющие сплавы на никелевой основе, нержавеющие стали для тонкостенных труб, магнитно-мягкие сплавы и др. В 1990-е гг. на этих заводах основную массу слитков специальных сплавов ВДП обрабатывали с применением плазменно-дугового нагрева.

Наряду с признанными способами, в свое время составившими основу специальной электрометаллургии (выплавки, рафинирования и обработки специальных сталей и сплавов), необходимо отметить разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона в начале 1980-х г. процесс выплавки слитков на основе индукционного нагрева — индукционный переплав в водоохлаждаемом медном секционном кристаллизаторе (ИПСК). Этот процесс, который использует мягкий нагрев, присущий индукционному источнику тепла, позволяет в отсутствие контакта жидкого металла с огнеупорами получать и рафинировать высокореакционные металлы и сплавы на их основе.

В ИЭС им. Е.О. Патона разработан ряд установок и технологий, основанных на ИПСК, внедренных в различных отраслях (утилизация отходов титана — «Киевтрактородеталь», Украина; рафинирование отходов ванадийсодержащих лигатур — Ленинабадский комбинат редких металлов, Таджикистан; рафинирование черновых редкоземельных металлов — Киргизский горно-металлургический комбинат; утилизация и рафинирование драгоценных металлов платиновой группы — Екатеринбургский завод по обработке цветных металлов, Россия.

Приведем прогнозную оценку перспектив дальнейшего развития СЭМ, которая была дана в статье Б. Е. Патона, В. И. Лакомского, Г. М. Григоренко, Л. Б. Медовара «Специальная электрометаллургия: полвека в действии. Что дальше?» (Специальная электрометаллургия. — 2003. — № 4. — С. 3–7): ***«Специальная электрометаллургия с первых дней своего рождения была и, по нашему мнению, надолго останется металлургической базой для таких прогрессивных областей деятельности человека, как авиация, космическая техника, электроника, медицина, энергетика».***

В. Я. Саенко

УДК 669.117.56

ПРОБЛЕМЫ РАЗЛИВКИ ЖИДКОЙ СТАЛИ С МАЛОЙ СКОРОСТЬЮ

А. К. Цыкуленко, Б. Б. Федоровский, В. Б. Смолярко, П. И. Загоровский, Л. Б. Медовар, В. А. Рябинин, В. М. Журавель, В. М. Ярош

Рассмотрены проблемы, возникающие при разливке жидкого металла с малой скоростью в некоторых технологических процессах металлургии. Показано, что эти проблемы можно решить с помощью специального устройства, позволяющего нагревать разливочный стакан током высокой частоты, генерируемым малогабаритным транзисторным преобразователем электроэнергии.

Problems, occurring during pouring of molten metal at a low speed in some technological processes of metallurgy, are considered. It is shown that these problems can be solved by using a special device allowing heating a pouring nozzle by high-frequency current generated by a small-sized transistor converter of electric power.

Ключевые слова: *разливка металла с малой скоростью; обогреваемый ковш; донный выпуск индукционный нагрев; разливочный стакан; транзисторный преобразователь*

В литейном и металлургическом производстве в некоторых случаях требуется разливать металл малыми порциями (несколько килограммов и даже меньше) из ковшей (или промежуточных ковшей) сравнительно большой вместимости. И если для металлов с низкой температурой плавления это можно успешно осуществить разными способами, то, например, для разливки малыми порциями стали необходимо решить ряд проблем.

Одна из основных проблем вызвана снижениям температуры жидкого металла в разливочном ковше при транспортировке и выполнении технологических операций. Среднее уменьшение температуры металла в ковше зависит от его вместимости, температуры предварительного подогрева, толщины шлакового покрова и многих других факторов. Поэтому сведения по этому вопросу довольно противоречивы. Согласно данным работы [1], среднее снижение температуры жидкой стали в ковше во время разливки при нормальных условиях (подогретый ковш, наличие довольно толстого шлакового покрова) составляет для ковшей вместимостью 30… 50 т 0,7… 0,9 град/мин, а для ковшей вместимостью свыше 250 т — 0,3 град/мин. Общее уменьшение температуры металла во время разливки достигает 20… 40 °С, продолжительность разливки — 30… 90 мин. Оптимальным превышением температуры жидкой стали, поступающей, например в кристаллизатор МНЛЗ, над температурой ликвидуса считается 10… 20 °С. При этом для компенсации тепловых потерь в процессе непрерывной разливки температура металла в ковше должна быть выше ликвидуса на 30… 60 °С.

Несколько большую скорость снижения температуры стали в ковше дает источник [2], в котором для 200-тонного ковша падение температуры металла равняется приблизительно 1 град/мин. В работе [3] скорость снижения температуры металла в ковше вместимостью 10 т оценена в 3 град/мин. Интерполируя литературные данные, можно приблизительно установить скорость охлаждения жидкого металла в разливочных ковшах разной вместимости. Принимая общее снижение температуры металла в ходе разливки 20… 40 °С, получим допустимое время разливки из ковшей разной вместимости (рис. 1). Для разливочных ковшей указанного диапазона вместимости (10… 250 т) это время составляет ориентировочно 10… 100 мин, т. е. диапазон скоростей разливки из разливочных ковшей достигает 1,0… 2,5 т/мин.

Вместе с тем с развитием металлургии, в частности появлением процессов порошковой метал-

© А. К. ЦЫКУЛЕНКО, Б. Б. ФЕДОРОВСКИЙ, В. Б. СМОЛЯРКО, П. И. ЗАГОРОВСКИЙ, Л. Б. МЕДОВАР, В. А. РЯБИНИН, В. М. ЖУРАВЕЛЬ, В. М. ЯРОШ, 2009

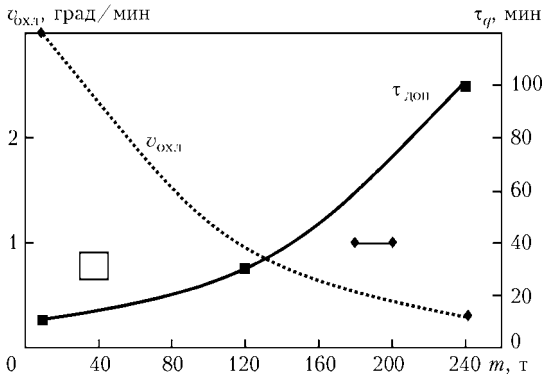

Рис. 1. Ориентировочные значения скорости охлаждения $v_{охл}$ и допустимого времени $\tau_д$ разливки жидкой стали в зависимости от вместимости разливочного ковша; m — масса жидкого металла

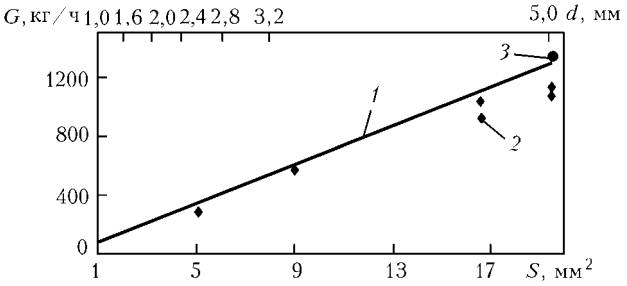

Рис. 2. Зависимость расхода G жидкой стали от площади сечения S (диаметра) разливочного отверстия: *1* — расчетная зависимость; *2* — литературные экспериментальные данные; *3* — данные моделирования

лургии, потребовалось существенное снижение скоростей разливки жидкой стали, что связано с необходимостью распыления струи жидкого металла газом под давлением. Сейчас оптимальные условия для распыления жидкого металла создаются при скорости подачи 1,5… 2,0 т/ч через выпускное отверстие диаметром 6,5… 7,0 мм. Такое уменьшение скорости (на порядок по сравнению с обычной) делает невозможной разливку сколько-нибудь значительного объема жидкого металла без подогрева в разливочном ковше из-за недопустимого охлаждения жидкого металла и зарастания выпускного отверстия.

В последние годы интенсивно развиваются способы специальной электрометаллургии с использованием жидкого металла. По сути, переплавные процессы можно рассматривать как разливку жидкого металла на малой скорости, когда жидкий металл приготавливается и разливается с одинаковой скоростью. Использование больших объемов жидкого металла, полученных в высокопроизводительных и экономичных сталеплавильных печах, по сравнению с плавлением расходуемых электродов в водоохлаждаемых кристаллизаторах, обеспечивает технологические и экономические преимущества. Однако здесь требуется решение проблем, связанных с созданием условий для продолжительного хранения жидкого металла и обеспечением малых скоростей разливки. Установлено, что оптимальная производительность выплавки слитков связана с их диаметром простым соотношением: производительность (кг/ч) равняется диаметру (мм). Таким образом, основная часть сортамента электрошлаковых слитков (диаметром до 1000 мм) изготовляется при производительности (скорости разливки) до 1 т/ч, что на два порядка меньше, чем при обычной разливке.

Скорость разливки жидкой стали регулируют путем изменения диаметра отверстия в стакане разливочного ковша. Более точного регулирования достигают соответствующим подъемом стопора или раскрытием шибера. Диаметр отверстия в стакане разливочного ковша или шиберного затвора зависит от вместимости ковша и составляет, как правило, 30… 80 мм.

Производительность заливки жидкого металла может быть вычислена по формуле [1]

$$G = \mu\gamma S\sqrt{2gH},$$

где μ — коэффициент расхода струи, зависящий от формы сливного отверстия и степени сжатия струи, характеризуемой отношением площади сечения струи к площади отверстия, обычно $\mu = 0{,}96…0{,}99$; γ — плотность жидкости; S — площадь поперечного сечения сливного отверстия; g — ускорение свободного падения; H — высота уровня жидкого металла над уровнем сливного отверстия.

Рассчитанная по этой формуле скорость разливки жидкой стали через сливные отверстия диаметром 30… 80 мм составляет от 630… 4484 кг/мин (в расчетах приняты следующие параметры: $\mu = 0{,}96$; $\gamma = 7{,}0$ г/см^3; $H = 250$ мм). Для выполнения технологических операций (распыление струи металла для получения порошка, электрошлаковая выплавка слитков и/или отливок с малой линейной скоростью и пр.) необходимая скорость разливки должна быть на порядок или два меньше. Зачастую это обеспечивается с применением порционной разливки. Однако этот способ далеко не всегда приемлем с учетом условий непрерывности технологического процесса.

На рис. 2 приведены расчетные диаметры сливного отверстия для обеспечения беспрерывной разливки с малой скоростью. Здесь нанесены литературные экспериментальные данные по скорости разливки суперсплавов [4], а также результаты собственного физического моделирования путем заливки воды через отверстия разного диаметра с учетом плотности жидкой стали.

Приведенные данные показали, что для выплавки слитков диаметром 500… 1000 мм с линейной скоростью 2 мм/мин необходимую скорость непрерывной разливки жидкого металла можно получить при диаметре выпускного отверстия 2,0… 3,5 мм, а для распыления струи металла с производительностью 1500 кг/ч он должен составлять около 6 мм.

Предполагается, что температура заливаемого жидкого металла неизменна, причем она должна быть довольно высокой для обеспечения жидкотекучести металла. В действительности процесс разливки жидкого металла сопровождается снижением температуры металла и ухудшением вследствие этого его

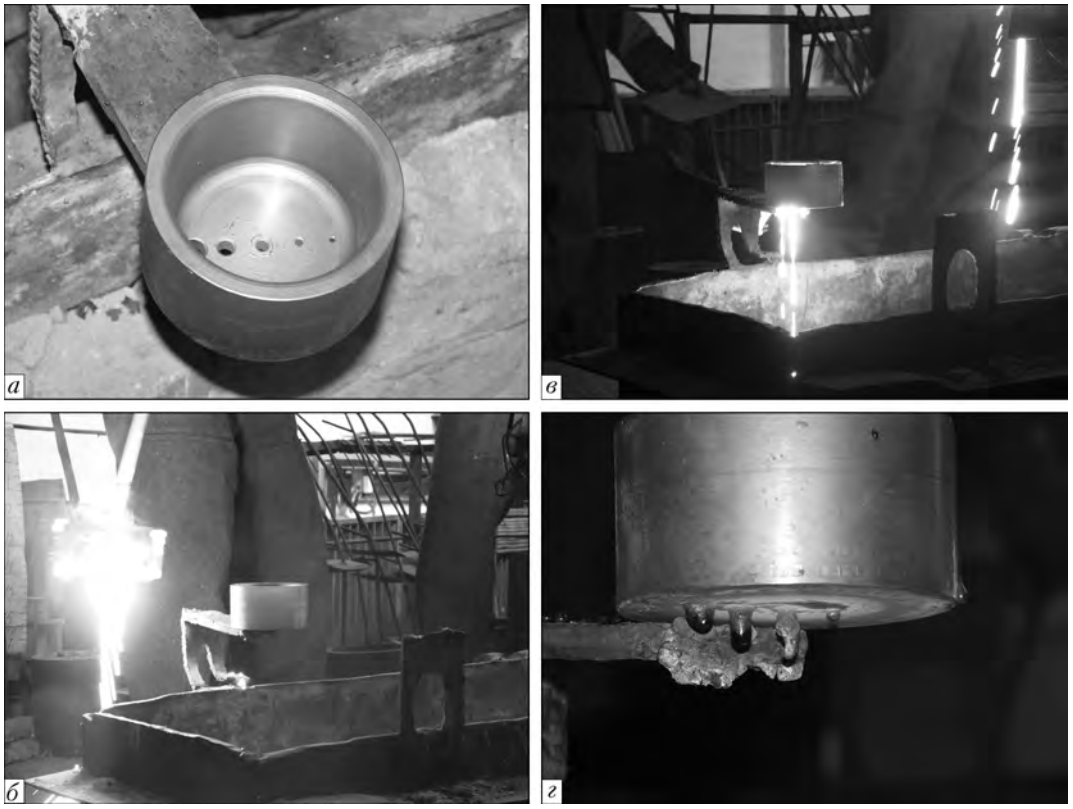

Рис. 3. Разливка стали через сливные отверстия разного диаметра: *а* — нагретая воронка; *б* — рабочий момент заливки с помощью разливной ложки; *в* — истечение струй жидкого металла через сливные отверстия; *г* — внешний вид донной поверхности воронки после заливки

жидкотекучести. Кроме того, этот процесс сопровождается постепенным зарастанием сливного отверстия.

Мы провели эксперименты по разливке жидкого металла через отверстия разного диаметра и получили следующие результаты. Стальную воронку вместимостью 250 $см^3$ (по стали примерно 2 кг) с отверстиями диаметром 2, 3, 5, 7 и 10 мм нагревали до температуры светлокрасного свечения (около 800 °С) (рис. 3, *а*) и заполняли с помощью двух четырехкилограммовых разливных ложек (рис. 3, *б*) жидким металлом (углеродистая сталь), приготовленным в электрошлаковой тигельной печи. В процессе заполнения воронки и разливки жидкий металл естественно охлаждался. При этом фиксировалось время зарастания выпускного отверстия и прекращение разливки из воронки (рис. 3, *в*). Эксперименты показали, что через отверстие диаметром 2 мм жидкий металл не потек (рис. 3, *в*); через отверстие диаметром 3 мм разливка прекратилась уже через 10 с; через отверстие диаметром 5 мм — через 40 с. Остаток металла вытек из отверстия диаметром 7 и 10 мм.

Непрерывное истечение жидкого металла через отверстие малого диаметра возможно лишь при хорошей жидкотекучести стали, что обеспечивается поддержанием соответствующей температуры металлической струи. Поэтому разливка металла через выпускные отверстия указанных диаметров возможна лишь из обогреваемого ковша. Но и в этом случае нужно обеспечить обогрев сливного стакана, чтобы предотвратить постепенное зарастание выпускного отверстия. К тому же, регулирование скорости даже непрерывной разливки металла через малые отверстия представляет довольно сложную техническую проблему.

С учетом специфики применения устройства для обогрева разливочного стакана и регулирования скорости разливки (высокая температура окружающей среды, необходимость размещения ковша с устройством непосредственно над объектом, стесненность в габаритном пространстве) наиболее целесообразным представляется устройство с индукционным высокочастотным нагревом стакана с выпускным отверстием.

Подобное устройство, названное холодным пальцем, разработано фирмой «Дженерал электрик» для разливки и распыления суперсплавов [4]. В этом устройстве разливной стакан является разрезным по вертикали медным водоохлаждаемым кристаллизатором, помещенным в индуктор высокочастотного генератора.

Разделенные через изоляционные прокладки секции кристаллизатора проницаемы для высокочастотного электромагнитного поля, с помощью которого осуществляется нагревание струи жидкого метала и предотвращается зарастание выпускного отверстия. При необходимости струю металла можно прервать, выключив высокочастотный нагрев. Для возобновления разливки металла достаточно включить высокочастотный генератор.

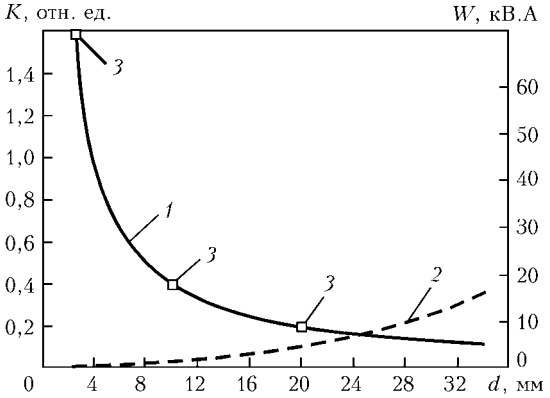

Рис. 4. Зависимости относительной поверхности K охлаждения и необходимой мощности W от диаметра стержня: *1* — относительная поверхность охлаждения и необходимая мощность для расплавления стержня, нагреваемого в водоохлаждаемом кристаллизаторе; *2* — вычисленная мощность, необходимая для нагрева и расплавления стержня заданного диаметра; *3* — экспериментальные данные

Судя по представленным в работе [4] данным, диаметр сливного отверстия варьировали от 4,5 до 7,0 мм. Спецификой конструкции разливного стакана для использования его в электрошлаковых технологиях является уменьшение диаметра сливного отверстия до 2,0… 3,5 мм и необходимость установки стакана в подине обогреваемого ковша. Проницаемость стакана для переменного магнитного поля высокой частоты тем выше, чем больше количество вертикальных секций, изолированных друг от друга.

Кроме того, необходимо обеспечить водяное охлаждение этих секций таким образом, чтобы подвод и отвод воды осуществлялся с одной стороны с учетом необходимости введения этого стакана в подину ковша. Указанные требования вступают в противоречия, еще больше усиливаемые с уменьшением диаметра кристаллизатора.

Для оптимизации конструкции стакана и определения необходимой мощности источника индукционного нагрева проведены эксперименты по нагреву и плавлению стальных стержней в разрезных медных водоохлаждаемых кристаллизаторах разного диаметра.

Нагревание и расплавление стержней в водоохлаждаемых кристаллизаторах сопровождается их одновременным охлаждением в результате теплоотвода в стенку кристаллизатора и потери тепла на излучение. При этом основными в кристаллизаторах малого диаметра следует, очевидно, считать потери, связанные с теплоотводом в стенки кристаллизатора, потерями на излучение в атмосферу можно пренебречь.

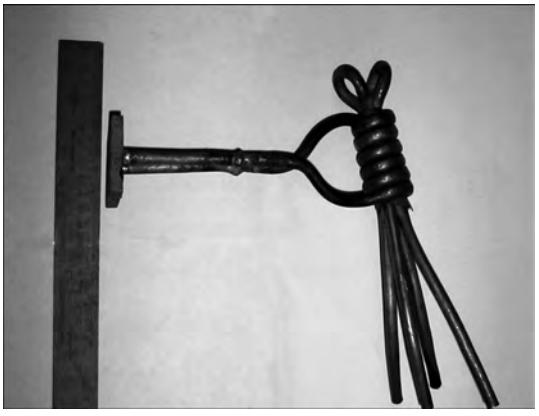

Рис. 5. Секционный кристаллизатор (d = 3 мм) в индукторе

Рис. 6 Внешний вид двухсекционного кристаллизатора (d = 10 мм) в индукторе

Относительная поверхность охлаждения кристаллизатора K (т. е. отношение периметра к площади его поперечного сечения) существенно возрастает с уменьшением диаметра кристаллизатора. Соответственно увеличиваются и относительные потери тепла. Поэтому несмотря на то, что для нагревания и расплавления стержня меньшего диаметра нужно затратить меньшее количество тепла Q (без учета потерь), необходимая мощность источника питания W может быть больше, чем для стержня большего диаметра.

На рис. 4 представлены зависимости W и K от диаметра стержня, причем ординаты W и K совмещены с учетом экспериментальных данных. Из рис. 4 видно, что экспериментальные значения мощности источника питания при индукционном нагреве стержня, расположенного в водоохлаждаемом кристаллизаторе, довольно точно ложатся на кривую $K = f(d)$, а оптимальным диаметром стержня с точки зрения минимизации необходимой мощности для его расплавления есть диаметр 25 мм (точка пересечения кривых $W = f(d)$ и $K = f(d)$. Полученные данные, не являющиеся очень точными, позволяют ориентироваться при конструировании разливочного стакана с малым диаметром выпускного отверстия.

Простейшей конструкцией является разрезной кристаллизатор, составленный из медных изолированных и тесно прижатых друг к другу трубок (рис. 5). В этом случае получается четырехсекционный кристаллизатор. Зазор между трубками образует сквозное проходное отверстие, сечение которого определяется внешним диаметром трубки. Для трубок с внешним диаметром 6 мм сечение сквозного отверстия эквивалентно сечению круглого отверстия диаметром 3 мм.

Увеличение внутреннего диаметра кристаллизатора до 10 мм позволило изготовить двухсекционный кристаллизатор со сверленными панелями (рис. 6). Стержни диаметром 3 мм расплавляли с помощью лампового генератора частотой 66 кГц и

Рис. 7. Шестисекционный ступенчатый кристаллизатор (d = = 20/2 мм) в индукторе

Рис. 9. Внешний вид керамического вкладыша со сливным отверстием диаметром 2 мм

мощностью 70 кВ·А. Для этого потребовалась вся его мощность. Для расплавления стержня диаметром 10 мм с помощью генератора частотой 66 кГц и мощностью 20 кВ·А оказалось достаточно 18 кВ·А.

С учетом определенного графически (рис. 4) оптимального диаметра кристаллизатора для индукционного нагрева стержня изготовлен ступенчатый шестисекционный кристаллизатор с внутренним диаметром 20 мм, донная часть которого высотой 3 мм имела сливное отверстие диаметром 2 мм (рис. 7). Для расплавления стержня диаметром 20 мм в указанном кристаллизаторе требовалась мощность 10 кВ·А, что близко к расчетному значению (рис. 4).

Однако расплавленный металл стержня после соприкосновения со стенкой кристаллизатора быстро терял температуру и не вытекал из отверстия. При этом даже увеличение мощности генератора до 20 кВ·А не позволяло повысить температуру металла в кристаллизаторе. Указанное явление, очевидно, связано с шунтированием вихревых токов слоем жидкого металла, соприкасающегося со стенкой кристаллизатора.

Были испытаны покрытия, состоящие из тонких (10…30 мкм) слоев электроизоляционного материала, нанесенных на внутреннюю стенку кристаллизатора. В качестве таких материалов служили различные оксиды, наносимые на стенку кристаллизатора с помощью плазменного напыления. Все испытанные материалы улучшали ситуацию, однако стойкость напыленного слоя, независимо от материала, оказалась недостаточной: после одно- и двукратного расплавления стержня потребовалось повторное напыление.

Рис. 8. Затвердевший металл на выходе из сливного отверстия

Испытание ступенчатого кристаллизатора с исходным отверстием диаметром 2 мм показало, что расплавленный в расширенной части кристаллизатора (диаметром 20 мм) металл кристаллизуется в выпускном отверстии, несмотря на то, что полку от стенки кристаллизатора к отверстию не охлаждали (рис. 8). Это свидетельствует о довольно интенсивном теплоотводе от сливного отверстия через полку в стенку водоохлаждаемого кристаллизатора. В то же время расплавление стержня в подобном стакане, но керамическом, позволило слить весь жидкий металл через отверстие диаметром 2 мм. Однако стойкость такого стакана оказалась довольно низкой — вышел из строя после первого же расплавления в нем стержня.

Намного большей оказалась стойкость керамического вкладыша с отверстием диаметром 2 мм (рис. 9), установленного в донной части водоохлаждаемого кристаллизатора. Хотя и в этом случае струя металла затвердевала в выпускном канале, образуя пробку длиной около 5 мм. Поэтому необходимо ограничивать высоту вкладыша значением 3 мм. В этом случае удается слить всю порцию жидкого металла, расплавленного в расширенной части кристаллизатора (рис. 10).

Индуктор, охлаждаемый водой, может рассматриваться в качестве кристаллизатора. Устройство в этом случае представляет собой своеобразную миниатюрную индукционную печь с донным выпуском жидкого металла через выпускное отверстие малого диаметра (рис. 11). Плавильная зона может быть цилиндрической ступенчатой или конической формы. В последнем случае индуктор также был коническим. Предполагали, что отключение питания такой печи должно приводить к быстрому зарастанию выпускного отверстия и прекращению разливки

Рис. 10. Вытекание струи жидкого металла через сливное отверстие диаметром 2 мм

Рис. 11. Внешний вид индукционной мини-печи

жидкого металла, а повторное включение — к расплавлению «пробки» и восстановлению разливки.

Эксперименты по расплавлению стержней конической формы в печи с конической плавильной зоной проводили с применением генератора частотой 2,5 кГц. Эксперименты показали, что для расплавления такого стержня нужна мощность 45…48 кВ·А, причем стержень расплавлялся только в верхней части печи. Положительные результаты получены при расплавлении стержней в печи с цилиндрической плавильной зоной.

Таким образом, с целью дальнейших экспериментов с применением жидкого металла, получаемого в обогреваемом ковше, можно рекомендовать два типа устройства для разливки металла с малой скоростью: секционный водоохлаждаемый ступенчатый кристаллизатор с внутренним диаметром 20…25 мм с керамическим вкладышем и индукционную мини-печь с донным выпуском жидкого металла.

Представляют интерес испытания указанных конструкций разливного стакана для использования в обогреваемом электрошлаковом разливочном ковше. Обычные ламповые высокочастотные генераторы непригодны в данном случае в качестве источника питания индуктора из-за специфических условий их эксплуатации. Поэтому для экспериментальных работ решили воспользоваться разработкой Института электродинамики НАНУ по конструированию малогабаритных транзисторных высокочастотных генераторов для индукционного нагрева.

Эксперименты по нагреву стрежней в секционных кристаллизаторах дали возможность сформулировать технические условия на разработку малогабаритного транзисторного высокочастотного генератора для индукционного нагрева струи жидкого металла, вытекающей из ковша с электрошлаковым обогревом через разливной стакан с малым сливным отверстием. В соответствии с этим заданием в Институте электродинамики разработали и изготовили пилотный образец малогабаритного транзисторного преобразователя мощностью 20 кВт, частотой 66 кГц (рис. 11). Этот преобразователь испытан в лабораторных условиях и показал достаточно стабильную работу.

Следующим этапом в разработке разливочного устройства малой производительности с функцией также и порционной разливки жидкого металла будет создание электрошлакового тигля со встроенным устройством для разливки.

1. *Разливка* стали / Под ред. В. И. Баптизманского. — Киев; Донецк: Вищ. шк., 1977. — 200 с.
2. *Общая* металлургия / Б. В. Челищев, П. П. Арсентьев, В. В. Яковлев, Д. И. Рыжонков. — М.: Металлургия, 1971. — 480 с.
3. *Europaische* Patentanmeldung 0 275 349 A1, Int. Cl. C21C 7/00, C21C 5/52. Verfaren zum secundar-metallurgischen Behandein von Metallschmeizen, insbesondere Stahischmeizen / Gerhard F. et al. — Publ. 27.07.88.
4. *Пат.* 5160532 США, МКИ С 21 С 1/00. Распыление электрошлакового рафинированного металла. — Опубл. 03.11.92.

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

Поступила 08.04.2009

УДК 669.117.56

ВЫБОР СПОСОБА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫХ КОРПУСОВ ФЛАНЦЕВЫХ ЗАДВИЖЕК ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В КОРРОЗИОННО-СТОЙКОМ ИСПОЛНЕНИИ

М. А. Полещук, В. Л. Шевцов, Л. Г. Пузрин, А. М. Круцан, А. И. Радкевич, М. Р. Чучман

Определены механические и антикоррозионные свойства литой электрошлаковой стали 12Х21Н5Т. Показано, что ее прочностные и пластические свойства находятся на уровне свойств толстолистового проката открытой выплавки и значительно превосходят свойства обычного литья. Установлено, что скорость коррозии литой электрошлаковой стали 12Х21Н5Т меньше, чем у проката из этой стали обычной выплавки (соответственно 0,10 и 0,14 мм/год). Предложено использовать способ высокотемпературной автовакуумной пайки для получения композиционных корпусов.

Mechanical and anticorrosion properties of cast electroslag steel 12Kh21N5T are determined. It is shown that its strength and ductile properties are at the level of properties of thick-sheet rolled metal of open melting and are greatly superior to the properties of a conventional casting. It was found that the rate of corrosion of cast electroslag steel 12Kh21N5T is lower than that in rolled stock of this steel of a conventional melting (0.10 and 0.14 mm/year, respectively). It was offered to use the method of high-temperature autovacuum brazing for producing composite bodies.

Ключевые слова: *литые электрошлаковые корпуса; сталь 12Х21Н5Т; механические и коррозионные свойства; автовакуумная пайка*

Одним из главных направлений укрепления энергетической безопасности Украины является увеличение собственной добычи природного газа. Его разведанные перспективные месторождения залегают на больших глубинах. Для их эффективной разработки необходимо специальное оборудование, способное работать при давлении до 35 и даже 70 МПа. В ряде случаев это оборудование должно быть также стойким к вредным примесям, содержащимся в добываемом газе, прежде всего к сероводороду H_2S и углекислому газу CO_2.

В зависимости от содержания этих примесей стандарт [1] предусматривает три исполнения оборудования, отличающихся классом используемых сталей. При содержании в газе до 6 % CO_2 используется оборудование в исполнении К1, в случае суммарного содержания H_2S и CO_2 до 6 % — К2, а при их содержании до 25 % — К3.

Основой такого оборудования являются задвижки с фланцами на концах патрубков, корпуса которых наиболее нагружены рабочим давлением и от прочности которых зависит безопасная работа (рис. 1). Для обеспечения надежности корпусов задвижек, работающих при давлении 35 и 70 МПа, их требуется изготовлять из металла с высокими прочностными и пластическими характеристиками, исключающими возможность хрупкого разрушения.

Общепринятая в мировой практике спецификация [2] не приводит конкретных марок сталей, используемых для изготовления корпусов фланцевых задвижек в каждом исполнении, а лишь указывает предельное содержание легирующих элементов. Кроме того, для каждого рабочего давления эта спецификация предусматривает минимально допустимые уровни механических свойств металла, из которого должно изготовляться соответствующее оборудование. Производители сами выбирают марки стали, которые при соответствующем рабочем давлении и содержании вредных примесей обеспечивают необходимую прочность и коррозионную стойкость изделия.

На украинских газовых промыслах чаще всего используют задвижки в исполнении К1. Для их изготовления Институтом электросварки им. Е. О. Патона совместно с фирмой «ИФ Элтерм» разработана и внедрена в производство прогрессивная технология электрошлакового литья заготовок корпусов из среднеуглеродистых легированных сталей. Освоен серийный выпуск заготовок корпусов с условным проходом диаметрами 50, 65 и 80 мм на давление 70 МПа и диаметром 65 мм на давление 35 МПа из сталей 38ХМ и 40Х. Корпуса фланцевых задвижек из электрошлаковых заготовок отличает самое высокое качество при низкой себестоимости [3, 4].

В связи с освоением в Украине ряда газовых месторождений на морском шельфе, в добываемом продукте которых содержится примесь H_2S, особую актуальность приобретает создание отечественного производства фланцевых задвижек высокого давления в коррозионно-стойком исполнении с тем, чтобы отказаться от их дорогостоящего импорта.

При повышенном суммарном содержании CO_2 и H_2S для изготовления корпусов фланцевых задвижек за рубежом применяют высоколегированные хромоникелевые стали. Для работы при высоком давлении корпуса выполняют из поковок [5]. С целью выбора стали, пригодной для изготовления

© М. А. ПОЛЕЩУК, В. Л. ШЕВЦОВ, Л. Г. ПУЗРИН, А. М. КРУЦАН, А. И. РАДКЕВИЧ, М. Р. ЧУЧМАН, 2009

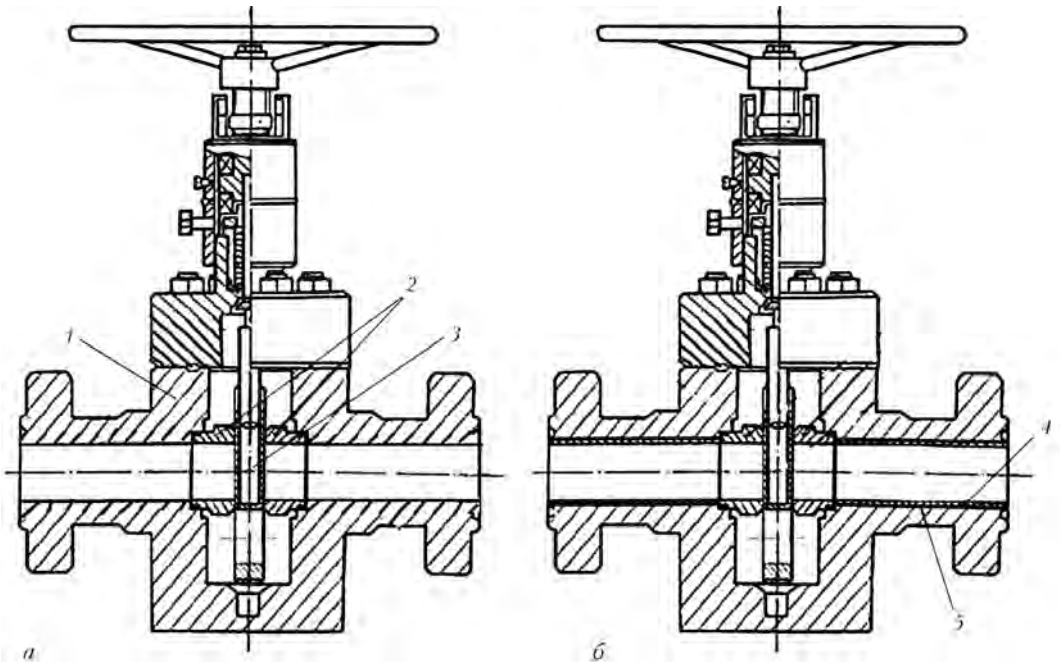

Рис. 1. Схема фланцевой задвижки высокого давления с цельнолитым электрошлаковым (*а*) и композиционным (*б*) корпусом: *1* — корпус; *2* — седла; *3* — шибер; *4* — коррозионно-стойкое покрытие канала; *5* — паяный шов

способами ЭШЛ заготовок корпусов таких задвижек, нами исследована феррито-аустенитная сталь марки 12Х21Н5Т, поковки из которой в настоящее время применяют для изделий в коррозионно-стойком исполнении.

Выплавлялись опытные электрошлаковые слитки диаметром 120 мм*. Слитки подвергали закалке в воде от температуры 1050 °С и из них изготовляли образцы для проведения механических и коррозионных испытаний литого электрошлакового металла.

Для компенсации угара титана при ЭШЛ применяли электрод-спутник из титановых проволок диаметром 5 мм. Результаты спектрального анализа выплавленных слитков приведены в табл. 1. Химический состав электрошлаковых слитков стали полностью удовлетворяет требованиям стандарта.

Результаты механических испытаний образцов приведены в табл. 2. Там же указаны требования стандартов на механические свойства сталей в виде обычного литья и толстолистового проката, а также требования спецификации [2] к прочности корпусных изделий, работающих при давлении 35 и 70 МПа. Как видно из табл. 2, литая электрошлаковая сталь 12Х21Н5Т по своим механическим свойствам не уступает прокату обычной выплавки и значительно превосходит обычное литье. Однако ее свойства соответствуют лишь требованиям к металлу корпусов, работающих при давлении до 35 МПа.

Для определения возможности изготовления из этих сталей литых электрошлаковых корпусов фланцевых задвижек в исполнении, стойком против примеси H_2S и CO_2, нами проведены коррозионные испытания металла выплавленных слитков, в ходе которых определяли скорость коррозии сталей в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным; стойкость против межкристаллитной коррозии (МКК); сопротивляемость сероводородному коррозионному растрескиванию под напряжением (СКРН), что является важнейшей характеристикой коррозионно-механической прочности, а также коррозионно-стойкую и коррозионно-циклическую трещиностойкость.

Скорость коррозии измеряли массометрическим методом в специально созданном автоклаве в потоке раствора, движущегося со скоростью 6 м/с, при температуре 30 °С и давлении 2 МПа в течение 20 ч [6]. Электрохимические измерения проводили по оригинальным [7] и общепринятым методикам с использованием потенциостата IPC-Pro. Склонность к МКК оценивали согласно ГОСТ 6032–2003 методом АМУ [8]. СКРН изучали способом статическо-

Таблица 1. Химический состав стали 12Х21Н5Т до и после ЭШЛ

Образец	Массовая доля элементов, %							
	C	Cr	Ni	Ti	Mn	Si	S	P
Исходный металл	0,11	21,3	4,9	0,29	0,40	0,34	0,014	0,021
ЭШЛ	0,12	21,0	5,0	0,30	0,41	0,36	0,010	0,020
ГОСТ 5632–72	0,09…0,14	20,0…22,0	4,8…5,8	0,25…0,50	≤ 0,8	< 0,8	≤ 0,025	≤ 0,035

*В работе принимали участие Ф. К. Биктагиров и А. П. Игнатов.

Таблица 2. Механические свойства стали 12Х21Н5Т в различных состояниях

Образец	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	KCU, Дж/см^2
ЭШЛ	360,6…387,3	709,9…748,0	35,3…43,0	40,0…48,5	86,9…107,2
	369,6	733,4	38,2	43,2	94,3
Толстолистовой прокат*	≥345	≥588	≥18	–	≥59
Отливка**	≥300	≥600	≥18	≥22	≥30
Требования для 35 МПа [2]	≥310	≥483	≥19	≥32	≥20
Требования для 70 МПа [2]	≥517	≥655	≥17	≥35	≥20

*Согласно ГОСТ 7350–77. **Согласно ТУ 26-06-066–82.

го растяжения гладких цилиндрических образцов с диаметром рабочей части 6,4 мм на базе 720 ч. Циклическую трещиностойкость металла оценивали по скорости роста трещин при изгибе образцов с частотой 5 Гц на воздухе и в коррозионной среде. Статическую трещиностойкость определяли на образцах с предварительно созданной усталостной трещиной, нагруженных консольным изгибом, на базе 720 ч. Во всех опытах испытательной средой являлся стандартный раствор NACE (5%-й раствор NaCl + 0,5 % CH_3COOH + H_2S, насыщенный, pH 3…4, (20±3) °С) [9].

Исследования показали, что скорость коррозии литой электрошлаковой стали 12Х21Н5Т снижается, по сравнению с исходным прокатом обычной выплавки (соответственно 0,10 и 0,14 мм/год). Эти данные согласуются с результатами определения потенциала коррозии. У электрошлакового литого металла он положительнее ($E_{кор}$ = −575 мВ), чем у исходного ($E_{кор}$ = −595 мВ), что свидетельствует о более высоких защитных свойствах продуктов коррозии, образующихся на поверхности электрошлакового металла. Аналогичные результаты получены при определении скорости коррозии электрохимическим способом. В растворе NACE без перемешивания при температуре 20 °С ток коррозии электрошлакового металла составлял 0,23 мА/см^2, в то время как для исходного проката обычной выплавки он равнялся 0,30 мА/см^2. Испытание литой электрошлаковой стали 12Х21Н5Т по методу АМУ показало полное отсутствие у нее склонности к МКК.

Общепринятым критерием по СКРН пригодности стали к эксплуатации в сероводородной среде считается значение отношения минимального напряжения, при котором образуются трещины в образцах в растворе NACE σ_{sscc}, к пределу текучести $\sigma_{0,2}$ не ниже 0,8. Измерения показали, что у литой электрошлаковой стали σ_{sscc} составляет 300 МПа, т. е. $\sigma_{sscc}/\sigma_{0,2}$ равно 0,81. Такое же значение имела и исходная сталь 12Х21Н5Т. Скорость роста трещины под циклической нагрузкой у литой электрошлаковой стали при испытании на воздухе оказалась ниже, чем у исходной деформированной (соответственно $5{,}2\cdot10^{-8}$ и $6{,}35\cdot10^{-8}$ м/цикл). Условный пороговый коэффициент интенсивности статических напряжений в упомянутом растворе для литой электрошлаковой стали составляет не менее 43 МПа·м$^{1/2}$, что превышает минимальные требования для сталей, применяемых для изготовления

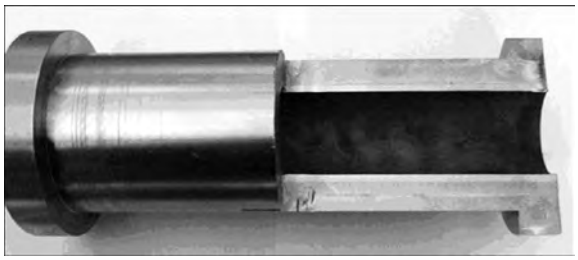

Рис. 2. Паяный макет рабочего канала композиционного корпуса с вырезанной частью

нефтегазового оборудования, стойкого против сероводородной среды (≥ 33 МПа·м$^{1/2}$).

Анализ полученных результатов показал, что из стали 12Х21Н5Т способом ЭШЛ можно успешно изготовлять корпуса задвижек в коррозионнностойком исполнении для работы при давлении до 35 МПа. Для корпусов, работающих при более высоких значениях давления, эта сталь не обеспечивает необходимых прочностных характеристик. Задачу получения высокой прочности одновременно с коррозионной стойкостью можно решить путем создания композиционного корпуса задвижки. В этом случае требуемую прочность обеспечит корпус из литой электрошлаковой конструкционной стали, а стойкость стенки канала, непосредственно контактирующей с коррозионной средой, — слой высоколегированной стали, нанесенный на ее поверхность (рис. 1, *б*).

Мы предлагаем новую технологию получения композиционных корпусов задвижек, использующую высокотемпературную автовакуумную пайку (АВП) [10]. Она основана на так называемом автовакуумном эффекте, заключающемся в образовании вакуума в узком герметизированном зазоре между деталями при их нагреве для пайки. Вакуум возникает из-за растворения кислорода и азота горячими стенками зазора еще до расплавления припоя. При этом поверхность стенок зазора очищается от оксидов.

При АВП применяют более широкие зазоры, чем при капиллярной пайке. В них припой затекает под действием собственного веса и в результате образовавшегося вакуума беспрепятственно проникает на большую глубину. Припой надежно смачивает свободные от оксидов стенки зазора и образует прочное соединение. Благодаря этим особенностям способом АВП можно соединять крупные детали. Имеется положительный опыт пайки этим способом углеродистой и нержавеющей стали [11].

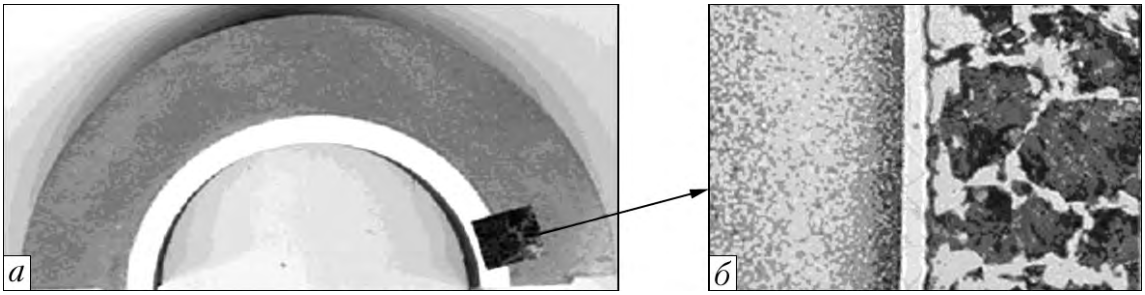

Рис. 3. Макрошлиф (*а*) и микроструктура (×50) (*б*) паяного соединения

Технологию получения композиционного корпуса задвижки с помощью АВП отрабатывали на макете, имитирующем задвижку с проходным каналом диаметром 50 мм с отношением диаметра паяного шва к его длине примерно 1:7. Основным металлом служил круглый прокат диаметром 130 мм из стали 40Х.

В качестве коррозионно-стойкого слоя использовали трубу с внутренним диаметром 50 мм и стенкой толщиной 5 мм из стали 12Х21Н5Т. Для ее размещения через всю заготовку на месте будущего рабочего канала путем механической обработки выполнили отверстие диаметром около 60 мм. В это отверстие вставили трубу и соединили ее торцы с заготовкой герметичными кольцевыми сварными швами. В герметизированном зазоре с верхнего конца разместили припой, в качестве которого применили порошок сплава системы никель–хром–кремний–бор с температурой плавления около 1000 °С. Нагрев макета производили в термической печи с воздушной атмосферой при вертикальном расположении рабочего канала и температуре 1050 °С.

При отработке технологического процесса основное внимание уделяли выбору оптимального размера зазора при сборке с учетом разницы в тепловом расширении трубы и корпуса. Требовалось достичь надежного заполнения припоем паяльного зазора при его минимальной ширине с целью получения высокой прочности паяного соединения.

После пайки макет подвергли закалке с отпуском по стандартному режиму для стали 40Х. Его внешний вид после вырезки образцов для исследования приведен на рис. 2. В паяном шве не было обнаружено непропаев, пор или каких-либо других дефектов. Макрошлиф зоны паяного соединения и микроструктура этой зоны показаны на рис. 3.

Испытания на срез паяного шва показали, что его прочность составляла 295 МПа, что в два раза превышает требования стандарта к двухслойной стали (ГОСТ 10885–75 «Сталь горячекатаная толстолистовая двухслойная»). Испытания образцов, вырезанных из основного слоя, подтвердили, что свойства стали 40Х в макете полностью соответствуют требованиям к прочности корпусных изделий, работающих при давлении 70 МПа.

Таким образом, отработанная на макете технология АВП дала возможность определить основные параметры процесса, необходимые для получения качественных композиционных корпусов задвижек. Новая технология позволяет простыми средствами наносить на стенки рабочего канала коррозионностойкий слой гарантированной толщины с требуемым химическим составом. При этом стенки рабочего канала после пайки не нуждаются в дополнительной механической обработке.

Полученные нами результаты дают основание использовать цельнолитые электрошлаковые корпуса фланцевых задвижек из стали 12Х21Н5Т для работы при давлении до 35 МПа на промыслах с повышенным содержанием коррозионно-активных примесей в добываемом природном газе. Для такого типа промыслов с рабочим давлением до 70 МПа мы предлагаем производить композиционные корпуса задвижек с использованием новой технологии АВП. Данные корпуса позволяют не только решить задачу одновременного обеспечения их прочности и коррозионной стойкости, но и значительно снизить стоимость производства, по сравнению с изготовлением корпусов целиком из дорогостоящих высоколегированных сталей.

1. *ГОСТ 13846–89*. Арматура фонтанная и нагнетательная. Типовые схемы, основные параметры и технические требования к конструкции. — Введ. 01.01.90. — 11 с.
2. *Спецификация* на устьевое и фонтанное оборудование 6API. 17-е изд.-- Введ. 01.02.96.
3. *Электрошлаковое* литье заготовок корпусов задвижек, работающих при высоком давлении / М. А. Полещук, Л. Г. Пузрин, В. Л. Шевцов и др. // Современ. электрометаллургия. — 2009. — № 1. — С. 12–17.
4. *Электрошлаковое* литье заготовок корпусов фланцевых задвижек с приплавлением патрубков / М. А. Полещук, Л. Г. Пузрин, В. Л. Шевцов и др. // Там же. — 2009. — № 2. — С.
5. *Гульянц Г. М.* Противовыбросовое оборудование скважин, стойкое к сероводороду: Справ. пособие. — М.: Недра, 1991. — 348 с.
6. *Пат. 36348* України, МПК G 01 N 17/00. Автоклав для корозійних досліджень матеріалів у агресивних середовищах / О. Радкевич, Р. Юркевич, Л. Карвацький, Г. Чумало. — Опубл. 27.10.2008; Бюл. № 20.
7. *Пат. 25819* України, МПК G 01 N 27/26. Спосіб мікроелектрохімічних вимірювань в рухомій краплі електроліту / М. С. Хома, М. Р.Чучман, Г. М. Олійник. — Опубл. 27.08.07; Бюл. № 13.
8. *ГОСТ 6032–2003.* Межгосударственный стандарт. Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы испытаний на стойкость к межкристаллитной коррозии. — Введ. 01.01.2005.
9. *NACE* Standard TM 0177-90. Standard Test Method Laboratory of Metals for Resistance to Sulfide Stress Corrosion Cracking in H2S Environments. — Houston: Tx. National Association of Corrosion Engineers (NACE), 1990. — 22 p.
10. *Пузрин Л. Г., Бойко Г. А., Атрошенко М. Г.* Автовакуумная высокотемпературная пайка. — Киев: О-во «Знание» Украинской ССР, 1975. — 16 с.
11. *Автовакуумная* пайка плакирующего слоя обечаек сосудов высокого давления / Л. Г. Пузрин, М. Г. Атрошенко, И. Г. Пещерин и др. // Проектирование технологического процесса пайки — основа повышения качества изделий и эффективности производства. — М.: Машпром, 1978. — С. 63–67.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины, Львов

Поступила 13.07.2009

УДК 669.046:546.34

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВАНАДИЯ И НИОБИЯ ИЗ ОКСИДНО-ФТОРИДНЫХ РАСПЛАВОВ ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ПЕРЕПЛАВЕ*

С. А. Истомин, В. В. Рябов, Э. А. Пастухов

Проведен электрошлаковый переплав электродов из армко-железа на различных электрических режимах для определения закономерностей электрохимического восстановления ванадия и ниобия из расплавленных оксидно-фторидных систем CaF_2–Al_2O_3–V_2O_5 (Nb_2O_5). Установлено, что благодаря применению асимметричного тока в электрошлаковом переплаве существенно улучшаются показатели процесса электролиза. Обнаруженные закономерности объяснены изменением концентраций ионов ванадия и ниобия в пульсирующем слое, согласно механизму нестационарной диффузии. Показано, что количеством того или иного восстановленного легирующего элемента можно управлять путем изменения электрических режимов переплава в зависимости от содержания его оксида в составе оксидно-фторидного расплава.

Electroslag remelting of electrodes of Armco-iron was performed at different electrical parameters to define the regularities of electrochemical recovery of vanadium of niobium from molten oxide-fluoride systems CaF_2–Al_2O_3–V_2O_5 (Nb_2O_5). It was found that characteristics of electrolysis process are greatly improved by using the asymmetric current in electroslag remelting. The revealed regularities were explained by change in concentrations of ions of vanadium and niobium in a pulsed layer in compliance with a mechanism of a non-stationary diffusion. It is shown that the amount of either recovered alloying element can be controlled by changing the electric parameters of remelting depending on the content of its oxide in the composition of oxide-fluoride melt.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав; флюс; электрохимическое восстановление; легирование; ток переменный, постоянный, асимметричный

Процесс электрошлакового переплава (ЭШП) существует уже полвека. В работах [1, 2] описаны этапы развития и новые технологии ЭШП, используемые в производстве. Отмечается устойчивый рост объемов металла ЭШП. Однако увеличение себестоимости электроэнергии и ферросплавов при переходе к мировым ценам значительно повысило стоимость металла, получаемого способом ЭШП, что сказалось на производстве и применении данного металла. Для снижения себестоимости предлагается дополнить процесс ЭШП электрохимическим легированием металла.

При электрохимическом способе ввода легирующих элементов в металл не требуется применение дорогостоящих лигатур и ферросплавов, поскольку восстановление происходит из оксидов и фторидов шлаковой фазы, отличающейся оптимальными физико-химическими свойствами. Кроме того, потенциал восстановления легирующих элементов должен быть более положительным, по сравнению с потенциалами восстановления компонентов, составляющих основу оксидно-фторидного флюса.

Разработка теории шлаков, выяснение их природы проводимости и других физико-химических свойств показали, что путем использования оксидно-фторидных шлаков в качестве электролитов можно осуществлять электрохимическое легирование, модифицирование и раскисление металлов [3–5]. Установлено, что электрошлаковый переплав на постоянном токе несколько отличается от переплава на переменном. Это связано с тем, что жидкая металлическая ванна, образующаяся в результате плавления расходуемого электрода и являющаяся одним из электродов, а также изменения в ее составе после переплава, зависят от рода тока и определяются суммарным вкладом анодного, катодного и других сопутствующих химических процессов [4].

Электрошлаковый переплав на переменном или постоянном токе хотя и фиксирует различия в восстановлении элементов из флюса, однако не позволяет проследить динамику электрохимических процессов, поскольку дает лишь начальный и конечный результаты. Кроме того, от обычного электролиза ЭШП отличает высокая электродная плотность тока (50… 100 А/см^2), необходимая для достижения высоких значений температуры (1700… 2000 °С), обеспечивающих плавление электрода, наличие трех стадий процесса с различной поверхностью реагирования. Катодом и анодом в этом случае служат жидкие металлы почти одного химического состава, что может привести к протеканию взаимообратимых электродных реакций и затруднению с организацией и управлением электролизными процессами при ЭШП. Одним из способов решения этой проблемы является применение при ЭШП асимметричного то-

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ-Урал.

© С. А. ИСТОМИН, В. В. РЯБОВ, Э. А. ПАСТУХОВ, 2009

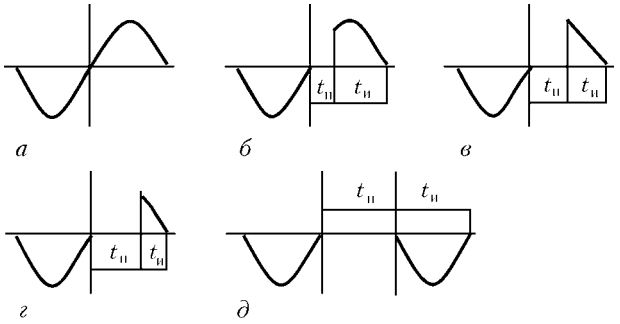

Рис. 1. Осциллограммы тока при следующих значениях постоянной составляющей, %: *а* — 0 (переменный ток); *б* — 25; *в* — 50; *г* — 75; *д* — 100 (постоянный пульсирующий ток)

ка с изменением симметрии его полупериодов до полного выпрямления [5].

В данной работе изучали восстановление ванадия и ниобия в зависимости от рода и полярности тока при переплаве армко-железа путем введения в состав оксидно-фторидного расплава 70 мас. % CaF_2–30 мас. % Al_2O_3 (флюс АНФ-6) добавки соответственно 5 и 10 мас. % V_2O_5 или Nb_2O_5. Процесс осуществляли на переменном, постоянном и асимметричном токах с изменяющейся долей постоянной составляющей (рис. 1).

Из рис. 2, *а, б* видно, что при переплаве под флюсом АНФ-6, содержащем 10 мас. % V_2O_5 (линии *2, 2′*), на переменном токе восстановилось 0,2 мас. % ванадия, постоянном (прямая полярность) — 0,32 мас. % и постоянном (обратная полярность) 0,42 мас. % ванадия. При переплаве под флюсом АНФ-6, содержащем 10 мас. % Nb_2O_5 (рис. 2, *в, г* линии *4, 4′*) на переменном токе восстановилось 0,32 мас. % ниобия, постоянном (прямая полярность) — 0,58 мас. % и постоянном (обратная полярность) — 0,67 мас. % ниобия.

Применение асимметричного тока позволило существенно увеличить количество восстановленных в металл ванадия или ниобия. Теория электрохимических процессов, протекающих на электродах при больших плотностях тока и высоких температурах, пока не разработана. Поэтому для объяснения полученных результатов можно принять во внимание следующие соображения.

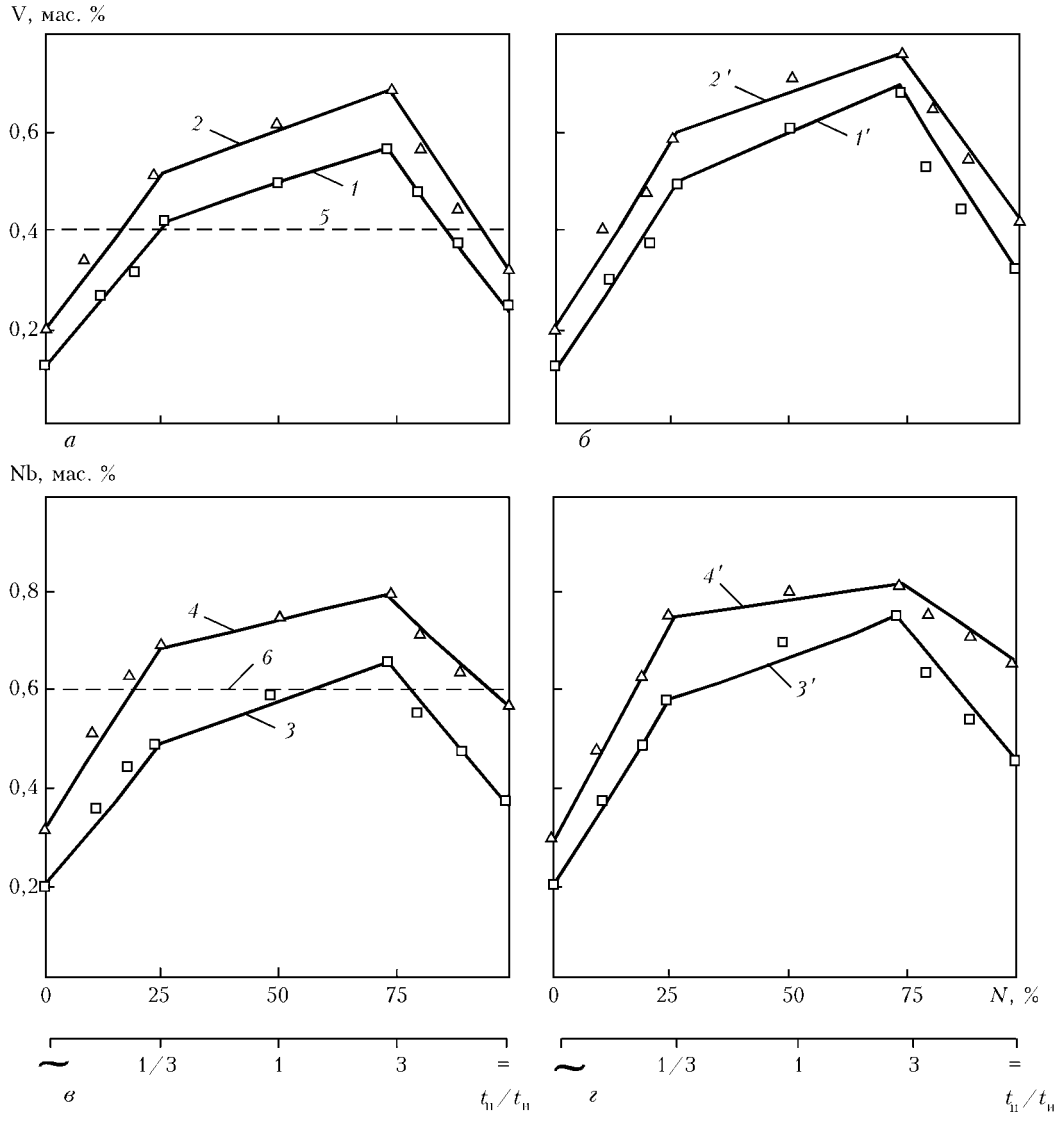

Рис. 2. Восстановление ванадия и ниобия в процессе ЭШП на переменном, постоянном и асимметричном токах при прямой (*а, в*) и обратной (*б, г*) полярностях: *1, 1′* и *2, 2′* — добавки 5 и 10 мас. % V_2O_5; *3, 3′* и *4, 4′* — добавки 5 и 10 мас. % Nb_2O_5 к флюсу АНФ-6; штриховыми линиями *5, 6* обозначено заданное количество восстановленного элемента; *N* — доля постоянной составляющей тока

При переплаве на постоянном токе основным токонесущим катодным процессом, по-видимому, является разряд катионов ванадия или ниобия. Расплавленный флюс состоит из катионов Ca^{2+}, Al^{3+}, V^{5+}, V^{3+}, V^{2+} (Nb^{5+}, Nb^{4+}, Nb^{2+}) и анионов F^-, O^{2-}. Потенциалы восстановления катионов ванадия (V^{2+}– 1,36 В, V^{3+}–1,39 В, V^{5+}–0,910 В) и ниобия (Nb^{2+}–1,34 В, Nb^{4+}–1,25 В, Nb^{5+}–1,18 В) более положительные, чем у Ca^{2+}– 2,3 В и Al^{3+}– 1,9 В [4]. При ЭШП частично восстанавливается кальций, который хорошо растворяется в оксидно-фторидном расплаве, образуя приэлектродный слой с электронной проводимостью. При этом электрически активная поверхность электрода смещается в глубь шлакового расплава, что приводит к снижению восстановления легирующих элементов.

При переплаве на переменном токе следует рассматривать уже не анод и катод, а анодные и катодные полупериоды на одном и том же электроде. Электрохимическое взаимодействие металла и шлака в основном сводится к перезарядке ионов на границе раздела металл–шлак. Разрядившись на катоде в одном полупериоде, восстановленный элемент анодно окисляется в другом и не будет успевать диффундировать в металл. Степень его перехода в новую фазу будет почти такой же, как и при постоянном токе. Решающую роль здесь играет поверхность реагирования жидкого металла со шлаком. Интенсивное гидродинамическое перемешивание жидких фаз способствует устранению диффузионных затруднений и росту площади взаимодействия между металлом и шлаком [6].

Переплав на асимметричном токе характеризуется процессами, протекающими при использовании как постоянного, так и переменного токов. Так, восстановление ванадия, наиболее электроположительного в системе CaF_2–Al_2O_3–V_2O_5, лимитируется диффузией его ионов к катоду. Примерно равное количество восстановленного ванадия при смене полярности свидетельствует о значительно большей скорости массопереноса к поверхности плавящегося электрода, поскольку площадь его в 3–4 раза меньше, чем поверхность жидкой металлической ванны.

Аналогичные результаты зафиксированы при переплаве на асимметричном токе в системе CaF_2–Al_2O_3–Nb_2O_5. При этом взаимное движение жидкой металлической пленки на торце расходуемого электрода и оксидно-фторидного расплава, вероятно, резко ускоряет массообмен между фазами, что повышает предельную плотность тока, а непрерывное обновление поверхности металла способствует снижению поляризации электрода.

При переплаве на асимметричном токе степень электрохимического восстановления ванадия или ниобия с вводом 25…75 % постоянной составляющей в 1,5…2,0 раза выше, чем на постоянном (рис. 2). Очевидно, дискретный характер асимметричного тока позволяет при изменении длительности импульсов регулировать расстояние, на которое удаляется фронт диффузии разряжающихся ионов.

В приэлектродной области образуется два диффузионных слоя: пульсирующий (вблизи электрода) и стационарный (более удаленный). Изменение концентрации ионов в пульсирующем слое происходит по механизму нестационарной диффузии. В течение действия импульса $t_и$ толщина пульсирующего слоя непостоянна и возрастает, достигая максимальных значений в конечной стадии его действия (рис. 3).

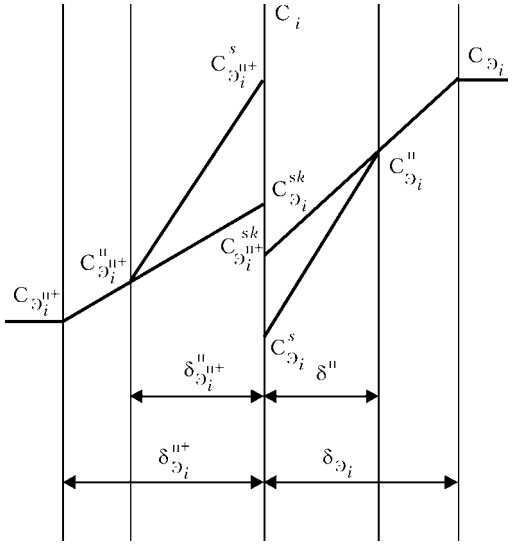

Рис. 3. Распределение концентраций в пределах диффузионных слоев: $C_{Эi}^{SK}$, $C_{Эi}^{SK_{ок}}$ — поверхностные концентрации соответственно восстановленной и окисленной форм реагента; $C_{Эi}$, $C_{Эi}^{ок}$ — концентрации элемента соответственно в металле и шлаке; $C_{Эi}^{S}$, $C_{Эi}^{S_{ок}}$ — поверхностные концентрации реагентов; $C_{Эi}^{П_{ок}}$, $C_{Эi}^{П}$ — концентрации элемента в пульсирующем слое; $\delta_{Эi}$, $\delta_{Эi}^{n+}$ — эффективные толщины диффузионных слоев; $\delta_{Эi}^{П_{ок}}$, $\delta_{Эi}^{П}$ — толщины пульсирующих слоев

В первом приближении толщину пульсирующего слоя можно оценить следующим образом [7]:

$$\delta_i = \sqrt{\pi D_i t_н}, \qquad (1)$$

где D_i — коэффициент диффузии i-го иона.

Скорость (ток) i-го элемента при переходе через межфазную поверхность в диффузионном режиме в этих условиях равна

$$i_i = n_i F D_i \frac{C_i}{\sqrt{\pi D_i t_и}},$$

где C_i — концентрация i-го элемента; F — число Фарадея.

Чем короче импульс, тем ближе располагается фронт диффузии к поверхности электрода, а следовательно, выше скорость i_i перехода элемента.

Во время паузы тока $t_п$ происходит релаксация выведенной из равновесия системы электрод–электролит. С уменьшением $t_и$ и увеличением $t_п$ потенциал электрода становится электроположительнее, что создает условия для более длительного разряда ионов. Пауза и обратный импульс способствуют предупреждению пассивного состояния металла, повышая тем самым значение тока для перехода легирующего элемента.

Увеличение степени восстановления ванадия или ниобия из оксиднофторидного расплава происходит до следующих параметров асимметричного тока: $t_и$ = 0,0025 с; $t_п$ = 0,0075 с. В таких условиях зафиксированы максимальные концентрации ванадия и ниобия в металле (рис. 2) как при прямой

(0,68 мас. % ванадия и 0,8 мас. % ниобия), так и при обратной полярности (0,78 мас. % ванадия и 0,86 мас. % ниобия) тока. При сокращении длительности импульса $t_и$ продолжительности паузы $t_п$ достаточно для установления стационарного диффузионного потока.

Определяя расстояние, на которое распространяется фронт диффузии при $t_п$ = 0,0075 с по формуле (1), а толщину стационарного диффузионного слоя — по зависимости

$$\delta_{Me^{5+}} = \frac{D^{0,5}_{(Me^{5+})}}{\beta},$$

получим условие равенства толщин пульсирующего и стационарного диффузионных слоев при значении константы конвекции $\beta = 5{,}88\ с^{-0,5}$. Согласно данным работы [8], $\beta = 6{,}17\ с^{-0,5}$ для аналогичных условий (диаметр расходуемого электрода 50 мм, скорость плавления металла 4 г/с), что близко к полученному нами значению, т. е. время паузы асимметричного тока 0,0075 с приблизительно равно времени установления стационарного диффузионного потока.

С увеличением $t_п$ градиент концентрации в диффузионном слое уменьшается и, соответственно, понижается скорость восстановления ванадия или ниобия и их концентрации в металле (рис. 2). При существенном уменьшении значения $t_и$ электролиз может прекратиться. Согласно работе [9], процесс импульсного электролиза протекает лишь при условии, когда длительность импульса превышает некоторое минимальное критическое время для данного электролита $t_{кр}$. Если $t_и < t_{кр}$, то сопротивление электролита резко возрастает, а количество активных ионов, характеризующихся избыточной энергией и способностью к разряду, уменьшается.

Наибольшей толщины диффузионного слоя достигают при постоянном токе. В таком случае минимальному (в рассматриваемых условиях) градиенту концентрации соответствует меньшая степень восстановления легирующего элемента.

На рис. 2 линия зависимости количества восстанавливаемого элемента от доли постоянной составляющей имеет два излома (при 25 и 75 % доли постоянной составляющей асимметричного тока). Это, по-видимому, связано с различными скоростями протекания процессов, происходящих при переплаве. Лимитирующим процессом на участке от 0 до 25 % является отвод разрядившихся катионов от поверхности раздела в металл, а на участке от 25 до 75 % — скорость разряда электроположительных ионов. Свыше 75 % возникают поляризационные явления, затрудняющие процесс электролиза.

Как следует из приведенного выше, применение асимметричного тока позволяет повысить показатели электролиза при ЭШП. При этом количество восстановленного ванадия или ниобия в получаемом слитке можно регулировать, изменяя электрические режимы переплава. Для решения этой задачи нами разработана феноменологическая модель технологического процесса, позволяющая корректировать электрический режим переплава в зависимости от содержания V_2O_5 или Nb_2O_5 в оксидно-фторидном расплаве с целью достижения заданной концентрации ванадия или ниобия в слитке металла (рис. 2, линии *5, 6*).

При восстановлении, например 0,6 мас. % ниобия (рис. 2, *в*, штриховая линия *6*), из флюса состава 90 мас. % АНФ6 — 10 % мас. Nb_2O_5 (рис. 2, кривая *4*) доля постоянной составляющей при прямой полярности составляет 20 и 95 %. В случае задания шага вариации концентрации Nb_2O_5 в шлаке 0,5 % программа для поддерживания постоянного химического состава по ниобию в слитке позволит спрогнозировать изменение электрических параметров технологического процесса. В данном случае, в пределах уменьшения концентрации Nb_2O_5 в шлаке от 10 до 5 мас. % программа предлагает для сохранения концентрации по ниобию в наплавляемом слитке 0,6 мас. % поддерживать электрические параметры технологического процесса в диапазонах 20…55 и 77…95 % доли постоянной составляющей тока при прямой полярности. Применение постоянного и особенно асимметричного тока в технологическом процессе усиливает электролизные явления и повышает содержание легирующего элемента в металле слитка ЭШП.

Следует также отметить, что при электрошлаковом переплаве на различных электрических режимах можно осуществлять электрохимическое восстановление одновременно нескольких легирующих элементов с близкими потенциалами процесса при соответствующем подборе оптимальных физико-химических свойств флюсов.

1. *Патон Б. Е., Медовар Л. Б.* Совершенствование электрошлакового переплава сталей и сплавов // Сталь. — 2008. — № 12. — С. 70–74.
2. *Патон Б. Е., Медовар Л. Б.* Электрошлаковому переплаву 50 лет // Электрометаллургия. — 2008. — № 11. — С. 32–37.
3. *Есин О. А., Гельд П. В.* Физическая химия пирометаллургических процессов. — М.: Металлургия, 1966. — Ч.2. — 713 с.
4. Лепинских Б. М., Манаков А. И. Физическая химия оксидных и оксифторидных расплавов. — М.: Наука, 1977. — 180 с.
5. *Лепинских Б. М, Истомин С. А.* Электрохимическое легирование и модифицирование металла. — М.: Наука, 1984. — 145 с.
6. *Cambell I.* Fluid flow and droplet formation in the electroslag remelting // J. of Metals. — 1970. — № 7. — P. 23–35.
7. *Дамаскин Б. Б., Петрий О. А.* Введение в электрохимическую кинетику. — М.: Высш. шк., 1975. — 388 с.
8. *Шанчуров С. М.* Разработка математической модели прогноза состава металла при электрошлаковом переплаве и сварке: Дис. … канд. техн. наук. — Свердловск: УПИ, 1989. — 233 с.
9. *Товбин М. В., Товбин А. В.* О механизме действия постоянного тока на растворы электролитов // Укр. хим. журн. — 1956. — **22**, № 2. — С. 146–152.

Ин-т металлургии УрО РАН, Екатеринбург

Поступила в редакцию 29.04.2009

УДК 669.187.56.002.2

ПОЛУЧЕНИЕ РАСХОДУЕМЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ИЗ ТИТАНОВОЙ ГУБКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СЛИТКОВ СПОСОБАМИ ЭШП И ДШП

Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко, В. А. Рябинин

Рассмотрены особенности и эффективность использования различных способов прессования титановой губки (холодное в глуходонной матрице, изостатическое в контейнере высокого давления, взрывом в металлической оболочке в специальной камере) при изготовлении расходуемых электродов для электро- и дугошлакового переплавов.

Peculiarities and effectiveness of use of different methods of pressing the spongy titanium (cold in a blind-bottom matrix, isostatic in a high-pressure container, explosion in a metal shell using a special chamber) in manufacture of consumable electrodes for electro- and arc-slag remelting are considered.

Ключевые слова: *электрошлаковый и дугошлаковый переплавы, губчатый прессованный электрод, изостатическое прессование, прессование взрывом*

Главным препятствием на пути к расширению и использованию титана в отраслях народного хозяйства является его высокая стоимость. Это связано прежде всего с особенностями технологии получения титановой губки, способом и трудоемкостью изготовления из нее расходуемых электродов, сложностью и энергоемкостью оборудования.

В настоящее время основным способом получения слитков из титана и его сплавов является вакуумно-дуговой переплав (ВДП), предусматривающий два передела. Для первого используют расходуемые электроды, полученные способом полунепрерывного прессования губки и скрапа в проходную матрицу на мощных прессах. Также могут применяться комбинированные электроды, изготовленные путем прессования брикетов с последующей их сваркой между собой. При производстве титановых сплавов в расходуемый электрод включают различные легирующие добавки. Процесс изготовления таких электродов трудоемкий, дорогостоящий, для его реализации требуются специальные оборудование и оснастка.

Эффективность применения способов электрошлакового (ЭШП) и дугошлакового (ДШП) переплавов для производства слитков из титана и его сплавов, как и других переплавных способов, во многом определяется и трудоемкостью изготовления расходуемых электродов. В работе [1] описано применение расходуемых электродов, прессованных из титановой губки, и лигатуры для получения слитков ЭШП из технического титана и сплава ОТ4. Для выплавки слитков диаметром 130 мм применяли круглые прессованные электроды диаметром 100 мм, а для плоских слитков сечением 175×75 мм — плоские прямоугольного сечения 45×135 мм. Электроды прессовали на вертикальном гидравлическом прессе с применением губки различных марок. В качестве легирующих добавок использовали алюминий электролитический, металлический марганец, металлический ванадий и алюминиево-молибденовую лигатуру.

В результате исследований структуры и механических свойств установлено, что однократная ЭШП расходуемых прессованных электродов позволяет получать технический титан и сплав ОТ4, по качеству не уступающие металлу двойного ВДП.

В процессе создания технологического процесса выплавки слитков ДШП из титана и его сплавов в бескамерных печах ЭШП [2–4] проведены специальные работы по оценке эффективности применения при ДШП прессованных электродов, полученных различными способами. В лабораторных и опытно-промышленных условиях опробованы следующие способы производства расходуемых электродов из титановой губки:

холодное прессование губки на лабораторном гидравлическом прессе усилием 200 кН в глуходон-

Рис. 1. Электроды из губчатого титана, полученные способом холодного прессования в матрице

© Л. Б. МЕДОВАР, В. Я. САЕНКО, В. А. РЯБИНИН, 2009

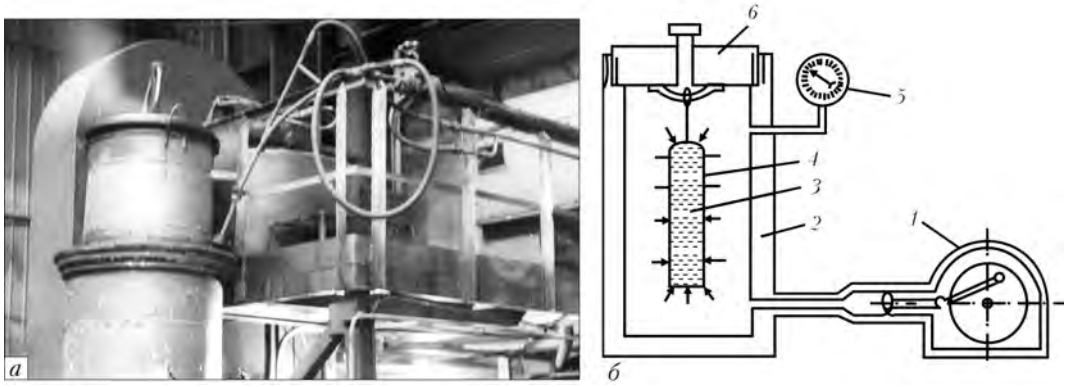

Рис. 2. Установка холодного изостатического прессования: *а* — внешний вид; *б* — схема; *1* — насос высокого давления; *2* — камера; *3* — титановая губка; *4* — эластичная оболочка; *5* — манометр; *6* — крышка

ной матрице, в качестве которой применяли стальную трубу. После прессования трубу разрезали и полученные брикеты (диаметром 40…80 мм) извлекали из оболочки (рис. 1). Однако получить плотные брикеты, а также сварить их между собой в один цельный электрод не удалось;

холодное изостатическое прессование. Для изготовления губчатых титановых электродов использовали контейнер высокого давления для холодного изостатического прессования, применяемый на заводе «Днепроспецсталь» при производстве высоколегированной быстрорежущей стали. Общий вид установки для холодного изостатического прессования приведен на рис. 2. Отработку технологии прессования осуществляли с применением титановой губки марки ТГ-ТВ, ТГ-120, находившейся в металлической и эластичной оболочке*. Опробовано также изостатическое прессование электродов из губки с закладной стальной бобышкой для облегчения их сварки с инвентарной головкой. Давление на прессе холодного изостатического прессования составляло 160 МПа. Полученные расходуемые электроды диаметром 150 и 400 мм (рис. 3) имели правильную цилиндрическую форму. После прессования оболочка легко отделялась от брикета. Плотность прессованного губчатого электрода была одинаковой по всему объему. Следует отметить, что в применяемой для прессования губчатых электродов эластичной оболочке в процессе многократного использования появлялись микротрещины. Поэтому перед загрузкой губки необходимо производить контроль оболочки на герметичность для исключения ее возможного разрыва и попадания рабочей жидкости в тело электрода при прессовании. Расходуемый электрод диаметром 400 мм, полученный способом изостатического прессования из губки ТГ-120, использовали для выплавки опытного слитка ДШП в кристаллизаторе сечением 565×565 мм с флюсовым затвором на печи ЭШП-5ВГ. Внешний вид слитка показан на рис. 4;

прессование титановой губки осуществляли способом взрыва* в специальной камере в условиях опытного производства ИЭС им. Е. О. Патона.

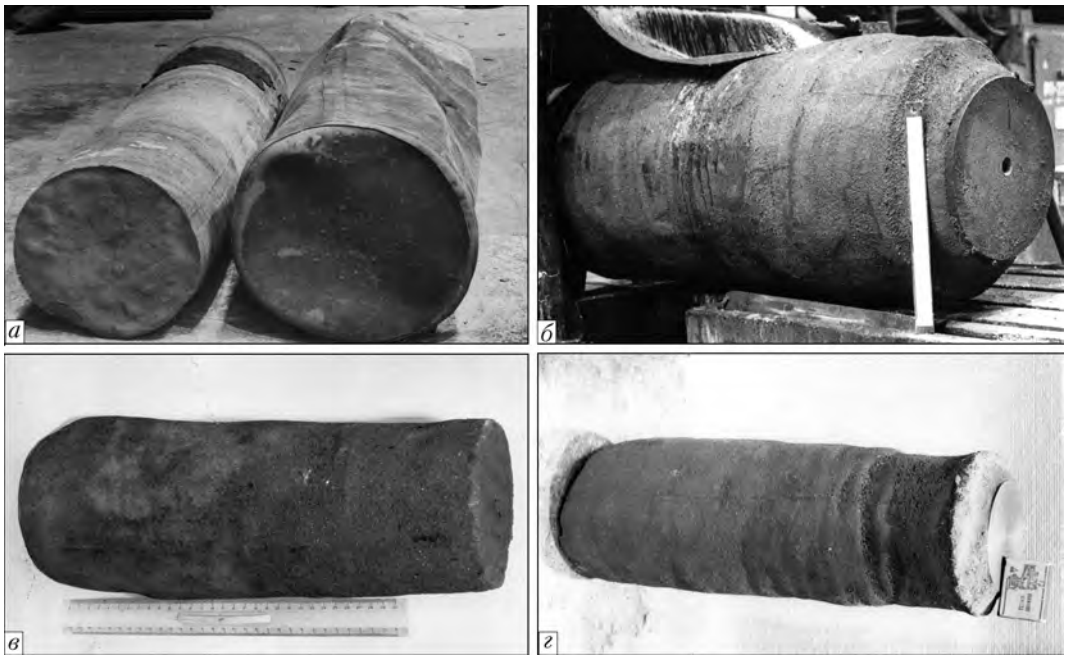

Рис. 3. Электроды длиной 1450 мм, диаметром 400 мм (*а, б*) и длиной 380 мм, диаметром 150 мм (*в, г*), полученные способом изостатического прессования: *а* — губка ТГ-ТВ; *б* — губка ТГ-120; *в* — губка ТГ-ТВ; *г* — губка ТГ-120

*В работе принимали участие С. С. Казаков, Ю. Г. Габуев, В. Н. Макогон (з-д «Днепроспецсталь»).

Рис. 4. Слиток из титана, выплавленный способом ДШП в кристаллизатор 565 мм

Рис. 5. Торец составного электрода диаметром 65 мм, полученного способом взрыва после плавки в режиме ДШП

Титановую губку марки ТГ-120 помещали в металлическую оболочку. После взрывной обработки оболочка отделялась от брикета. Брикеты, полученные способом взрыва, отличались высокой плотностью. Сварку таких брикетов при изготовлении составных расходуемых электродов проводили без особых затруднений.

Прессованные способом взрыва губчатые электроды использовали для одностадийного производства слитков титана способом ДШП. Переплав проводили на установке Р-951 в кристаллизаторе сечением 200×200 мм, оснащенном флюсовым затвором. Для переплава использовали расходуемый электрод, сваренный по длине из трех брикетов длиной 300 мм и диаметром 65 мм каждый, собранных в трехпалый пучок.

Составной электрод крепили к инвентарной головке диаметром 130 мм, проходящей через флюсовой затвор без нарушения герметизации плавильного пространства кристаллизатора. В качестве защитного газа использовали аргон, подаваемый под крышку флюсового затвора.

Рис. 6. Слиток из титана, выплавленный способом ДШП в кристаллизатор 200 мм

Процесс ДШП составного электрода из прессованной способом взрыва губки проходил стабильно. Внешний вид торца электрода после окончания плавки (рис. 5) свидетельствует о равномерности плавления электрода. Слиток имел хорошую поверхность, покрытую тонким слоем гарнисажа (рис. 6). Исследование содержания газов в электроде и слитке показало, что в процессе ДШП прирост кислорода составил всего 0,012, а азота — 0,003 %.

Результаты проведенных механических испытаний показали, что литой металл слитка ДШП ($\sigma_в$ = = 490 МПА, $\sigma_т$ = 377 МПа, δ = 18 %, ψ = 25 % — даны средние значения) соответствуют требованиям ГОСТ 23755–79 к прокату из металла ВТ1-0 ВДП толщиной 60…150 мм ($\sigma_в \geq 294$ МПа, $\delta \geq 10$ %; остальные показатели не регламентируются).

Таким образом, расходуемые электроды, полученные из титановой губки путем изостатического прессования, а также прессования взрывом, отличаются высокой технологичностью и могут быть эффективно использованы для выплавки слитков титана способами ЭШП и ДШП.

1. *Свойства* технического титана и сплавов типа ОТ4, полученных электрошлаковой плавкой / С. М. Гуревич, В. П. Дидковский, Ю. К. Новиков и др. // Автомат. сварка. — 1963. — № 4. — С. 29–33.
2. *Переплав* губчатых титановых расходуемых электродов методами ЭШП и ДШП / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1994. — № 3-4. — С. 7–11.
3. *Arc-slag* remelting of steel and alloys / B. I. Medovar, V. Ja. Saenko, G. M. Grigorenko et al. // Cambridge International Science Publishing. — 1996. — P. 1–160.
4. *Arc-slag* remelting — state- of-the-art and prospects of development / B. E. Paton, V. Ja. Saenko, Yu. M. Pomarin et al. // Proc. of Intern. symp. on ESR technology & equipment (Kyiv, 15–17 May, 2001). — Kyiv, 2001. — P. 177–185.

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

Поступила в редакцию 08.07.2009

*В работе принимали участие Л. А. Волгин, Л. С. Гаврилюк (ИЭС им. Е. О. Патона).

УДК 539.21:621.39.048

НАНОЧАСТИЦЫ МАГНЕТИТА, ПОЛУЧЕННЫЕ СПОСОБОМ КОНДЕНСАЦИИ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПУЧКОВ В ВАКУУМЕ

Ю. А. Курапов, Г. Г. Дидикин, С. М. Романенко, С. Е. Литвин

Приведены результаты исследования структуры конденсатов, фазового состава и размеров наночастиц Fe_3O_4 в зависимости от температуры подложки при осаждении их из паровой фазы с использованием электронно-лучевой технологии испарения и конденсации в вакууме. Показана возможность получения стабилизированной коллоидной системы наночастиц магнетита Fe_3O_4. Исследовано распределение по размерам наночастиц Fe_3O_4 в водном растворе декстрана.

Results of investigation of structure of condensates, phase composition and sizes of nanoparticles Fe_3O_4 depending on temperature of substrate during their deposition from a vapor phase using electron beam technology of evaporation and condensation in vacuum are given. The feasibility of producing the stabilized colloid system of nanoparticles of magnetite Fe_3O_4 is shown. Distribution of nanoparticles of Fe_3O_4 in water solution of dextran was investigated.

Ключевые слова: *электронно-лучевое испарение и осаждение; наночастицы; магнетит*

Прогресс в области нанотехнологий способствовал разработке наноматериалов для аэрокосмической, автомобильной и электронной отраслей промышленности. Перспективной областью применения нанотехнологий является также медицина. Больше всего изучены и применяются в электронике и медицине наночастицы оксидов железа–магнетита (Fe_3O_4) и маггемита (γ-Fe_2O_3). Магнетит используют для синтеза магнитных жидкостей и магнитных лекарственных препаратов. В отличие от многих металлов и их соединений, магнетит практически безвреден для организма человека. Впервые методику получения стабилизированного коллоидного раствора магнетита предложил В. Элмор [1].

Традиционно для приготовления наночастиц применяют химические способы [2]. Как правило, наночастицы производят путем смешивания водных растворов солей соответствующих металлов с восстановителями, при этом получают растворы, в которых наряду с наночастицами присутствуют примеси ионов компонентов, участвующих в реакциях.

Физические способы получения наночастиц позволяют в большинстве случаев избавиться от посторонних примесей, как при эрозионно-взрывных способах [3, 4]. Однако их производительность не может, по-видимому, конкурировать со способом молекулярных пучков, осуществляемым в электронно-лучевых испарительных установках [5].

В медицине магнетит используют в качестве дисперсной фазы в магнитных жидкостях. Дисперсные частицы из-за небольших размеров находятся в жидких средах в интенсивном тепловом движении. Непокрытые металлические наночастицы агрегируют в водной среде. При введении в организм животного они образуют тромбы сосудов, приводят к разрыву и некрозу тканей. Чтобы добиться агрегативной стойкости, биосовместимости и снижения токсичности, наночастицы стабилизируют.

Для создания адсорбционных слоев, препятствующих укрупнению частиц вследствие их слипания, в коллоид вводят стабилизатор — поверхностно-активное вещество (ПАВ), в качестве которого, как правило, используют вещества, состоящие из полярных органических молекул, создающих на поверхности дисперсных частиц адсорбционно-сольватные слои [6].

Согласно работе [7], коллоидные частицы магнитной жидкости являются агрегатами однодоменных частиц. Агрегаты образуются из крупных частиц, имеющихся в магнитной жидкости, при отсутствии магнитного поля [8, 9]. В стойких коллоидах размер частиц не превышает 10… 15 нм.

Материалы и методика эксперимента. Наночастицы получали путем испарения и последующей конденсации смешанных молекулярных потоков магнетита Fe_3O_4 (или маггемита γ-Fe_2O_3) и соли NaCl в вакуумной электронно-лучевой установке по методике, описанной в работе [5]. Температура поверхности конденсации (стальной или медной подложки) составляла 50… 200 °С. Конденсат, отделенный от подложки, исследовали в исходном состоянии и в виде коллоидных водных систем.

© Ю. А. КУРАПОВ, Г. Г. ДИДИКИН, С. М. РОМАНЕНКО, С. Е. ЛИТВИН, 2009

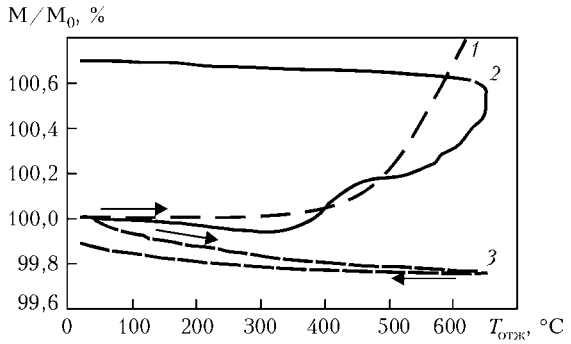

Рис. 1. Кинетика окисления Fe (*1*), Fe_3O_4 (*2*) и Fe_2O_3 (*3*) на воздухе при нагреве и охлаждении

Кинетику окисления железа, магнетита и маггемита изучали в атмосферной среде с помощью термогравиметрического анализатора TGA7 («Perkin Elmer», США) чувствительностью до 0,1 мкг при скорости нагрева/охлаждения 10 °С/мин в диапазоне значений температуры 20…650 °С. Структуру и химический состав конденсатов исследовали на растровом сканирующем электронном микроскопе «CamScan 4D» в режиме вторичных и упругоотраженных электронов и энергодисперсионной системы рентгеноспектрального микроанализа «INCA-200 Energy». Структуру и фазовый состав частиц анализировали методами просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе «Hitachi H-800» при ускоряющем напряжении 100 кВ. Распределение наночастиц по размерам в коллоидной системе определяли методом фотон-корреляционной спектроскопии [10, 11] на лазерном корреляционном спектрометре «Zeta Sizer-3» (фирма «Malvern», Великобритания).

Результаты исследований. Процессы окисления железной стружки, магнетита и маггемита на воздухе с увеличением температуры исследовали тер-

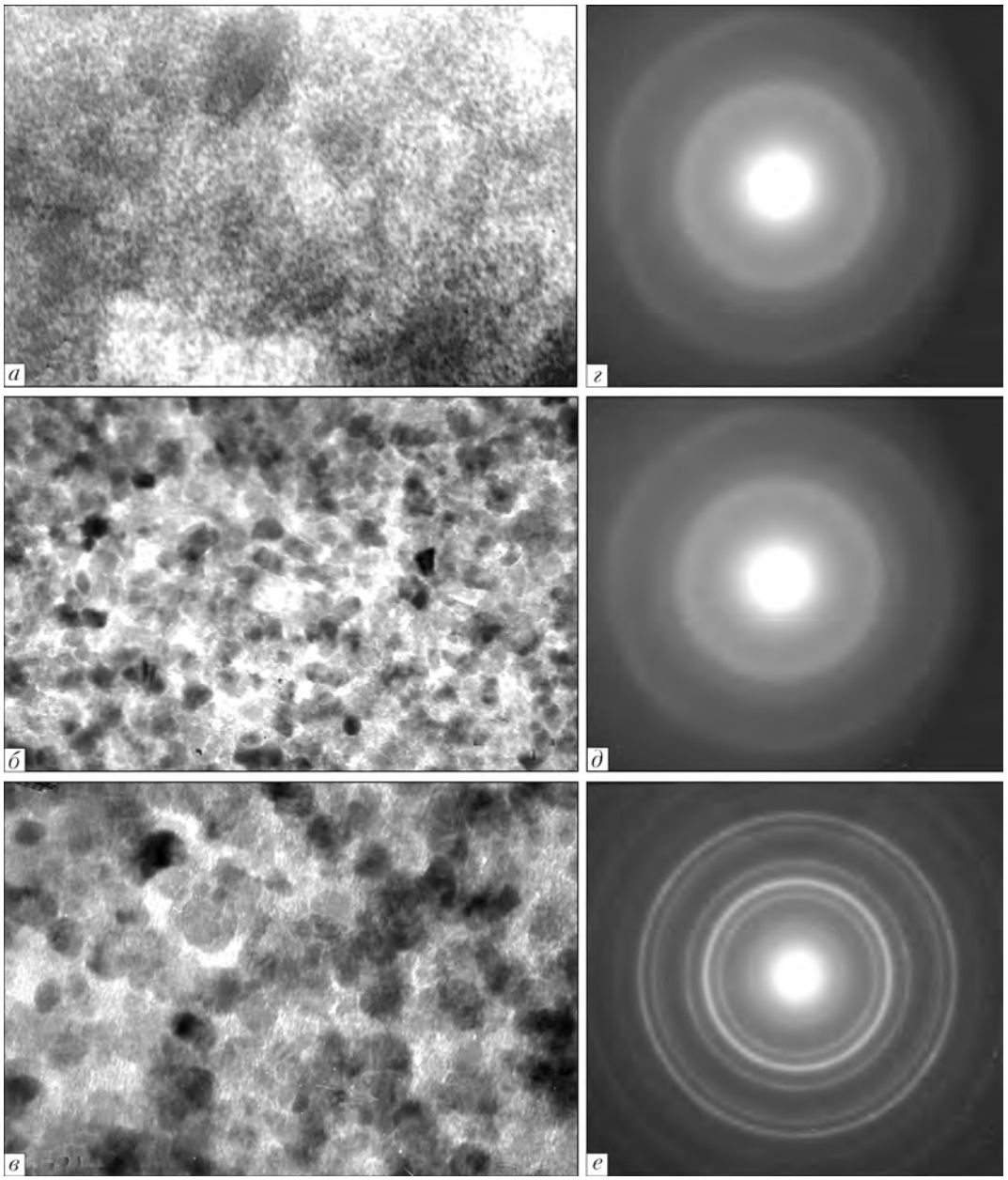

Рис. 2. Микроструктура (*а–в*) и рентгенограммы (*г–е*) наночастиц Fe_3O_4 в зависимости от температуры осаждения конденсатов, °С: *а, г* — 30; *б, д* — 100; *в, е* — 220; × 400000, уменьш. 1,125

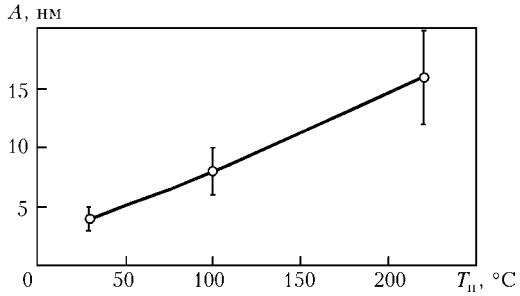

Рис. 3. Изменение среднего размера частиц Fe_3O_4 в зависимости от температуры подложки $T_п$; A — размер частиц Fe_3O_4

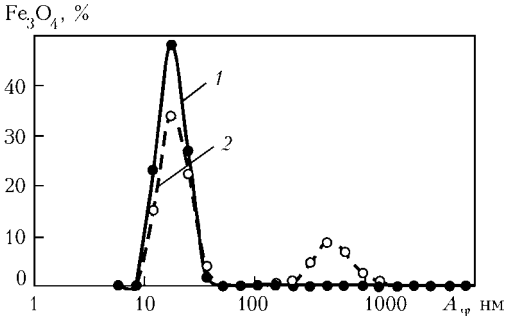

Рис. 4. Количественное (*1*) и объемное (*2*) распределения частиц в водном растворе декстрана

могравиметрическим методом. На рис. 1 приведены кривые окисления этих материалов. Как видно, процесс окисления железа начинается при температуре около 350 °С (рис.1, кривая *1*). Образец магнетита доокисляется, увеличивая свою массу, от температуры 340 °С и продолжает окисляться до 650 °С; при охлаждении масса образца остается практически неизменной (рис. 1, кривая *2*). Масса образца маггемита, высшего оксида железа, в процессе нагрева на воздухе до 650 °С и при последующем охлаждении практически не изменяется (рис. 1, кривая *3*).

Маггемит в процессе нагрева и расплавления в вакууме разлагается с выделением кислорода и последующим переходом в магнетит. Процесс испарения магнетита в вакууме проходит стабильно, поэтому исследованные конденсаты были получены при использовании магнетита.

Изготовленный на подложке с градиентом температуры конденсат композиции Fe_3O_4 + NaCl изменяет свою окраску по мере увеличения температуры подложки от 50 до 200 °С от светло-коричневой до черной. Химическим анализом установлено присутствие железа, натрия, хлора и кислорода, при этом массовые доли железа и кислорода отвечают стехиометрическому составу Fe_3O_4.

В ходе исследования методом просвечивающей электронной микроскопии взвеси частиц, полученных путем растворения конденсата в воде, зафиксировано присутствие наноразмерной субстанции (рис. 2, *а–в*). Средний размер частиц возрастал от 3…4 до 15…20 нм при увеличении температуры подложки от 20 до 200 °С (рис. 3). По мере увеличения размеров частиц дифракционные кольца становятся четкими (рис. 2, *г–е*). Фазовый состав частиц соответствует Fe_3O_4.

Конденсат с наночастицами магнетита исследовали на предмет их стабилизации водным раствором декстрана. При растворении конденсата с частицами магнетита в воде наночастицы слипались в агрегаты и выпадали в осадок. В случае стабилизации наночастиц декстраном некоторая доля частиц магнетита покрывалась адсорбционным слоем ПАВ и зависала в растворе, изменяя его окраску и прозрачность. Остальные частицы образовали агрегаты, выпадающие на дно сосуда [8, 9].

На рис. 4 показано распределение по размерам наночастиц Fe_3O_4 в водном растворе декстрана (с учетом соотношения количества), определенное с помощью фотонкорреляционной спектроскопии. Количественная кривая распределения частиц имела один максимум при 18 нм (рис. 4, кривая *1*), а наночастиц с учетом их объема — максимумы при 18 и 400 нм (рис. 4, кривая *2*). Максимум при 400 нм свидетельствует о наличии крупных агрегатов, хотя количество их практически равно нулю, на что указывает функция распределения частиц по количеству (рис. 4, кривая *1*). Этими крупными агрегатами, по-видимому, могут быть отдельные комплексы, состоящие из молекул самого ПАВ.

Таким образом, синтез наночастиц магнетита способом конденсации молекулярных пучков в вакууме позволяет производить сухую медицин-скую субстанцию, исключить обязательную операцию совмещения процесса синтеза со стабилизацией наночастиц при приготовлении коллоидных систем. Этот способ дает возможность получать, консервировать, сохранять и транспортировать наночастицы. Последующая стабилизация наночастиц при помощи ПАВ, в частности декстраном, открывает перспективы приготовления дисперсных растворов с заданной фракцией распределения магнетита для нужд медицины.

1. Elmore W. C. Ferromagnetic colloid for studing magnetic structures // The Physical Review. — 1938. — **54**, № 4. — P. 309.
2. *Бибик Е. Е., Бузунов О. Е.* Достижения в области получения и применения магнитных жидкостей. — М.: ЦНИИ «Электроника», 1979. — 60 с.
3. *Каплуненко В. Г., Косинов Н. В., Поляков Д. В.* Получение новых биогенных и биоцидных наноматериалов с помощью эрозионно-взрывного диспергирования металлов // Сб. тр. по материалам науч.-практич. конф. с междунар. участием. — Новосибирск, 2007. — С. 134–137.
4. *Месяц Г. А., Баренгольц С. А.* Сильноточная вакуумная дуга как коллективный многоэктонный процесс // Докл. РАН. — 2000. — **375**, № 4. — С. 462-465.
5. *Мовчан Б. А.* Электронно-лучевая нанотехнология и новые материалы в медицине — первые шаги // Вісник фармакології та фармації. — 2007. — № 12. — С. 5–13.
6. *Нечаева О. А.* Структурная организация магнитных коллоидов в электрическом и магнитном полях: Дис. … канд. физ.-мат. наук. — Ставрополь, 2003. — 120 с.
7. *Майоров М. М.* Измерение вязкости феррожидкости в магнитном поле // Магнитная гидродинамика. — 1980. — № 4. — С. 11–18.
8. *Krueger D. A.* Theoretical estima tes of equilibrium chain Lenghts in Magnetic colloids // Colloid and Interfase Science. — 1979. — **70**, № 3. — P. 558–563.
9. *Krueger D. A.* Review of agglomeration in ferrofluids // IEEE Transactions of Magnetics. — 1980. — **16**, № 2. — P. 251–256.
10. *Лазерная* корреляционная спектроскопия и биология / А. Д. Лебедев, Ю. Н. Левчук, А. В. Ломакин, В. А. Носкин. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
11. *Применение* лазерной корреляционной спектроскопии для ЭФ биологических объектов в растворах / А. Д. Лебедев, А. В. Ломакин, В. А. Носкин и др. // Инструментальные методы в физиологии и биофизике. — Л.: Наука, 1987. — С. 90–95.

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

Поступила в редакцию 19.05.2009

УДК 669.187.526:51.001.57

РАФИНИРОВАНИЕ КРЕМНИЯ СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ

В. А. Березос, А. Г. Ерохин

Проведен эксперимент по рафинированию кремния способом электронно-лучевой плавки примесей. Измерено содержание примесей в образцах кремния до и после ЭЛП на установке INA-3 методом масс-спектрометрии вторичных постионизированных нейтральных частиц. Показано, что электронно-лучевой переплав может быть эффективным способом рафинирования кремния от примесей.

Experiment on silicon refining was made using the method of electron beam melting of impurities. The content of impurities was measured in samples of silicon before and after EBM in unit INA-3 by the method of mass spectrometry of secondary post-ionized neutral particles. It is shown that the electron beam remelting can be a rather effective method of silicon refining from impurities.

Ключевые слова: *кремний; примеси; рафинирование; электронно-лучевой переплав*

Для развития солнечной энергетики требуется создание новых технологий производства кремния, обеспечивающих радикальное снижение его стоимости. В настоящее время 80 % солнечных элементов как наземного, так и космического назначения изготовляют на основе монокристаллического кремния. Более половины себестоимости монокристалла составляет стоимость кремниевого сырья — поликристаллического кремния высокой чистоты, произведенного по технологии водородного восстановления хлоридов кремния [1].

Полный цикл производства кремния, включая получение поликремния, существует лишь в трех странах: США, Японии и Германии. Всего семь корпораций из этих стран контролируют мировой рынок, что позволяет им держать цены и прибыль на довольно высоком уровне [2]. Поэтому другие страны крайне заинтересованы в собственном производстве кремния.

Возрастающие потребности в фотоэлектрических преобразователях и модулях для солнечных электростанций формируют неудовлетворенный спрос на поликремний для их производства. Прогнозируемый дефицит на ближайшую перспективу колеблется от 5 до 15 тыс. т поликремния в год [2]. В этих условиях расширение мощностей по производству поликремния имеет хорошую экономическую перспективу.

В настоящее время в целях снижения стоимости солнечных элементов при их изготовлении используются отходы полупроводникового кремния, которые образуются при производстве изделий микроэлектроники. Однако количество таких отходов ограничено и не сможет удовлетворить растущий спрос в ближайшем будущем. Кроме того, при получении поликристаллических кремниевых слитков путем плавления из отходов полупроводникового кремния возникает проблема загрязнения расплава примесями из материала тигля.

Избежать этого можно за счет существенного улучшения качества кристаллического кремния, получаемого способом карботермического восстановления в электродуговых печах, который после последующей относительно простой и недорогой очистки станет пригодным для изготовления солнечных элементов. Исключение из цикла производства кристаллического кремния хлорсиланового передела и водородного восстановления позволит существенно уменьшить его стоимость.

Среди всех современных способов специальной электрометаллургии электронно-лучевая плавка (ЭЛП) является наиболее эффективным способом рафинирования металлов, широко применяемых в исследовательской практике и промышленности [3]. Традиционное использование технологии ЭЛП с промежуточной емкостью при выплавке слитков обеспечивает удаление из металлов неметаллических включений, газов и примесей с высокой упругостью пара.

В литературе отсутствуют данные о попытках рафинирования кремния способом ЭЛП.

В данной работе использовали ЭЛП для рафинирования кристаллического кремния от примесей.

Исследования проводили на электронно-лучевой установке УЭ-208 [3]. В качестве исходного материала использовали кристаллический кремний марки Кр0 ГОСТ 2169-69, поставленный ООО «Солнечная энергетика» (г. Омск, Россия). С целью предотвращения загрязнения расплава кремния в ходе экспериментальных плавок изготовили двухсекционную промежуточную емкость, сливной

© В. А. БЕРЕЗОС, А. Г. ЕРОХИН, 2009

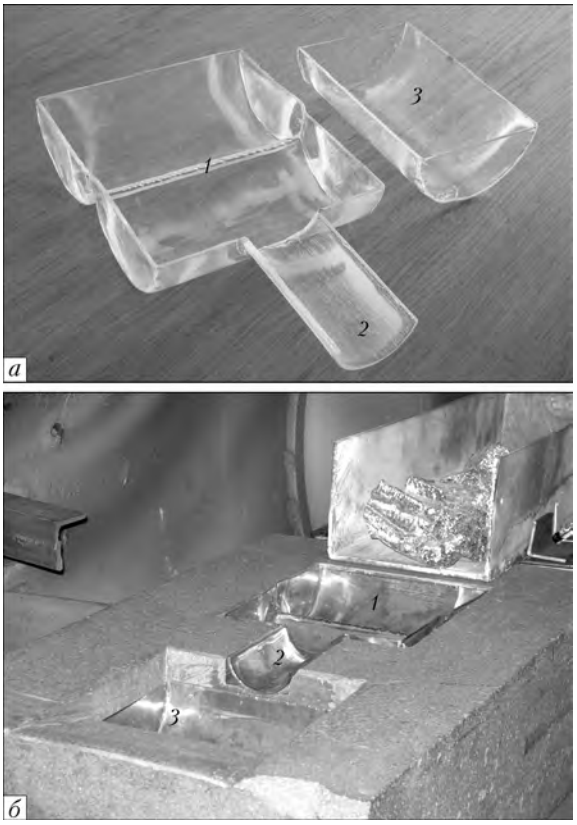

Рис. 1. Двухсекционная промежуточная емкость (*1*), сливной лоток (*2*) и изложница (*3*) из кварцевого стекла (*а*) и кварцевого стекла в графитовой форме (*б*)

лоток и изложницу из кварцевого стекла, в которых происходил процесс плавления, рафинирования и кристаллизации (рис. 1, *а*). Кварцевую двухсекционную промежуточную емкость, сливной лоток и изложницу помещали в графитовую форму (рис. 1, *б*).

Во время экспериментов кремний сплавлялся в кварцевую двухсекционную промежуточную емкость электронными лучами, а расплав поддерживался в жидком состоянии (рис. 2).

Рафинирование кремния в процессе плавки происходило в трех зонах: в первой секции промежуточной емкости — путем осаждения включений высокой плотности (таких как карбид кремния), во второй секции — за счет испарения примесных элементов с высокой упругостью пара и в кварцевой изложнице — путем зонной очистки от примесей с различной растворимостью в твердой и жидкой фазах.

После выдержки расплава при температуре примерно 1500 °С в течение 10 мин в кварцевой двухсекционной промежуточной емкости производили слив через сливной кварцевый лоток в изложницу из кварцевого стекла, где происходила кристаллизация расплава кремния. Во время формирования слитка по поверхности кристаллизующегося расплава производили медленное сканирование электронным лучом в одном направлении вдоль большей стороны кварцевой изложницы со скоростью движения жидкого расплава $v = 5$ мм/мин. Сканирование осуществляли от левого борта кварцевой изложницы к правому, причем при достижении последнего луч резко возвращался к противоположному краю, в результате чего в каждый момент времени

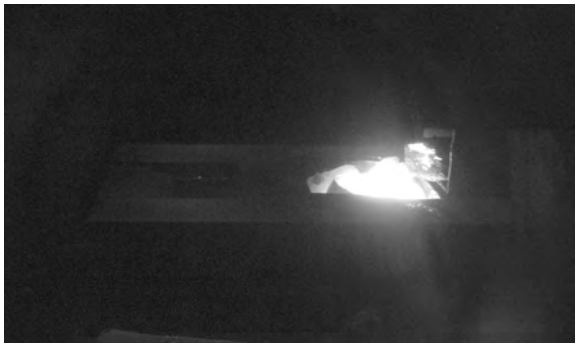

Рис. 2. Процесс плавления кремния в электронно-лучевой установке УЭ-208

расплавленной являлась некоторая небольшая часть образца. Такая расплавленная зона передвигалась по образцу с помощью электронно-лучевого нагрева, что приводило к перераспределению примесей между твердой и жидкой фазами.

Суммарная мощность электронно-лучевого нагрева составляла 50 кВт. Поскольку у большинства примесей растворимость в жидкой фазе выше, чем в твердой [4], то в зоне кристаллизации примеси в жидком состоянии перемещались в торец слитка, где затем находились в твердом состоянии до окончания формирования слитка в изложнице. Остывание слитка производилось в вакууме, после чего он извлекался из кварцевой изложницы. Загрязненный примесями торец слитка отрезали. Из центральной части полученного слитка отобрали образцы для количественного элементного анализа.

С этой целью изготовляли образцы с плоской областью исследования диаметром 15 мм и шероховатостью поверхности не более 0,2 мм. Попытки изготовить сколы с необходимыми параметрами для измерений были неудачными. Поскольку материал представляет собой поликристалл, его скол отличается развитой поверхностью с неоднородностями на уровне 0,5… 1,0 мм. В неоднородностях скапливаются примеси, которые при измерениях вносят значительные погрешности. Поэтому для получения ровной поверхности перед проведением анализа образцы подвергались сухой механической шлифовке с последующим травлением анализируемой поверхности.

Измерения образцов кремния до и после ЭЛП проводили на установке INA-3 (Leybold-Hearues, Германия) методом масс-спектрометрии вторичных постионизированных нейтральных частиц (МСВНЧ) при следующих параметрах измерения:

уровень вакуума — 5×10^{-3} Па;
область распыления плазмы — диаметр 8 мм;
область сканирования ионного пучка — 2×2 мм;
энергия первичных ионов — 1,5 кэВ;
первичный ионный ток — 1 мА;
рабочий газ — аргон 99,998, %;
глубина области анализа — 0,8… 1,5 мкм;
диапазон исследованных масс — $1{,}66 \cdot 10^{-24}$… …$3{,}32 \cdot 10^{-22}$ г;
масс- разрешение — $4{,}98 \cdot 10^{-22}$ (лучше $9{,}9 \cdot 10^{-25}$ г);
чувствительность — не более $2 \cdot 10^{-6}$ %.

Типичный вид спектра образца после ЭЛП приведен на рис. 3.

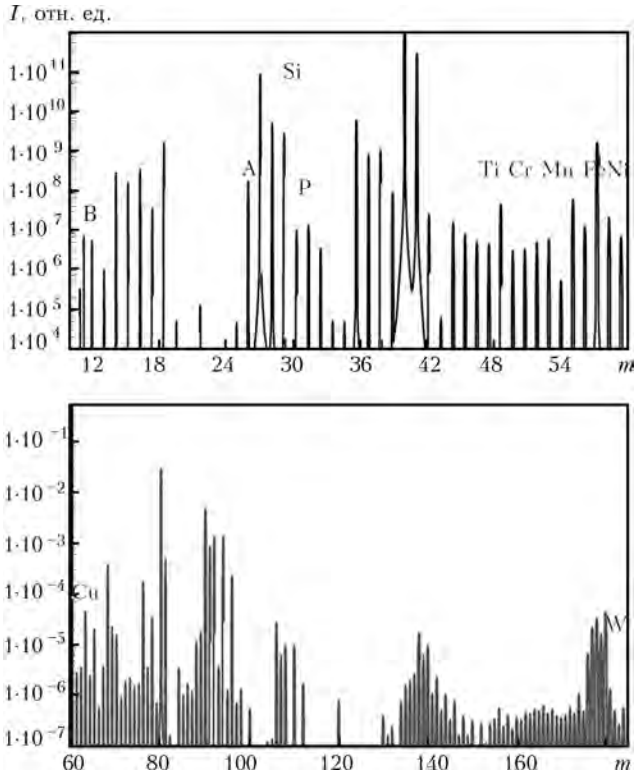

Рис. 3. МСВНЧ спектра образца после ЭЛП; I — интенсивность; m — атомная масса элементов

Содержание примесей в кристаллическом кремнии Кр0 до и после ЭЛП

Элемент	Массовая доля примесей, %		$C_{эф}$, %
	$C_{исх}$	$C_{элп}$	
B	$4{,}5\cdot10^{-3}$	$4{,}2\cdot10^{-3}$	7
Mg	$9\cdot10^{-4}$	$1\cdot10^{-4}$	88
Al	0,30	0,16	47
P	$18\cdot10^{-4}$	$9\cdot10^{-4}$	50
Ca	0,11	0,015	86
Ti	$3{,}1\cdot10^{-2}$	$2{,}5\cdot10^{-2}$	19
Cr	$8{,}4\cdot10^{-3}$	$7{,}4\cdot10^{-3}$	12
Mn	$1{,}1\cdot10^{-2}$	$0{,}9\cdot10^{-2}$	18
Fe	0,62	0,49	20
Ni	$8{,}2\cdot10^{-3}$	$7{,}6\cdot10^{-3}$	7
Cu	$9{,}7\cdot10^{-3}$	$9{,}6\cdot10^{-3}$	1
As	$3{,}4\cdot10^{-5}$	$0{,}8\cdot10^{-5}$	76

При расчетах концентраций использовались коэффициенты элементной чувствительности стандартной программы обработки данных установки INA-3.

Результаты элементного анализа примесей приведены в таблице. Эффективность рафинирования определяли по следующей формуле:

$$C_{эф} = (C_{исх} - C_{ЭЛП}) \cdot 100 / C_{исх},$$

где $C_{эф}$ — эффективность рафинирования, %; $C_{исх}$ — массовая доля примесей в исходном материале, %; $C_{элп}$ — массовая доля примесей в материале после ЭЛП, %.

Анализ химического состава выплавленных слитков показал, что в процессе ЭЛП происходит рафинирование кремния от газов и металлических примесей. Для большинства примесей в кремнии характерны очень низкие значения эффективного коэффициента распределения (Al — $2{,}8\cdot10^{-3}$, Ti — $2\cdot10^{-6}$, Fe — $6{,}4\cdot10^{-6}$) [5], поэтому при кристаллизации они переходили из твердой фазы кристаллизующегося слитка в жидкую зону расплава, перемещаемую электронно-лучевым нагревом на торец слитка. Из этого следует, что кристаллизацию можно использовать в качестве эффективного способа очистки кремния при ЭЛП. Бор, у которого давление паров меньше, чем у кремния, и коэффициент распределения составляет 0,8, практически не удалялся. Благодаря высокой температуре процесса рафинирования и наличию вакуума содержание фосфора и алюминия уменьшилось в ходе ЭЛП в два, мышьяка — в четыре, кальция — в семь, магния — в девять раз.

Таким образом, процесс ЭЛП может быть эффективным способом рафинирования кремния от примесей.

Выводы

1. Предложено использовать электронно-лучевую плавку для улучшения качества кристаллического кремния.
2. Разработана конструкция двухсекционной промежуточной емкости из кварцевого стекла для плавки и рафинирования кремния способом ЭЛП.
3. Установлено, что для рафинирования кремния при ЭЛП дополнительно использовали механизм зонной очистки.
4. Определено, что при переплаве кремния способом ЭЛП происходит эффективное удаление таких примесей, как магний, алюминий, фосфор, кальций, мышьяк и др.
5. Показана необходимость продолжения исследований по интенсификации процессов удаления бора, углерода, никеля, меди из кремния при ЭЛП.

1. *Полупроводниковый* кремний: Теория, технология производства / Ю. Н. Таран, В. З. Куцова, И. Ф. Червоный и др. — Запорожье: ЗГИА, 2004. — 344 с.
2. *Наумов А. В.* Производство фотоэлектрических преобразователей и рынок кремниевого сырья в 2006–2010 гг. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2006. — № 4. — С. 3–8.
3. *Электронно*-лучевая плавка / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 265 с.
4. *Зонная* плавка / Под ред. В. Н. Вигдоровича: Сб. науч. тр. — М.: Мир, 1970. — 366 с.
5. *Способы* получения особо чистых неорганических веществ / Б. Д. Степин, И. Г. Горштейн, Г. З. Блюм и др. — Л.: Химия, 1969. — 480 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, Киев

Поступила 06.04 2009

УДК 669.187.58

ПОЛУЧЕНИЕ БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ СПЛАВОВ СПОСОБОМ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ПРИ ИПСК

В. А. Шаповалов, И. В. Шейко, Ю. А. Никитенко

Исследован процесс получения быстрозакаленных высокореакционных и высокотемпературных сплавов способом диспергирования расплава при индукционной плавке в секционном кристаллизаторе. Отработаны технологии плавки и диспергирования, получены основные закономерности. Исследовано качество быстрозакаленных сплавов.

Process of producing the rapidly hardened highly-reactive and high-temperature alloys by the method of melt dispersion during induction melting in a sectional mould was investigated. Technologies of melting and dispersion were optimized and main regularities were obtained. The quality of rapidly hardened alloys was examined.

Ключевые слова: *диспергирование; секционный кристаллизатор; высокореакционные сплавы; металлический расплав; диск-холодильник; быстрозакаленные чешуйки*

Практически во всех отраслях промышленности широкое применение находят сплавы с аморфной, нано- и микрокристаллической структурами металлические. В каждом из направлений ставятся свои задачи и требования как к чистоте продукции, так и к форме получаемых изделий. Достаточно объемные слитки с аморфной структурой изготовляют только для определенных систем, не всегда имеющих применение. Основную массу сплавов получают в виде покрытий с аморфной или микрокристаллической структурой или изделий, имеющих хотя бы один микроразмер (лента, провод, чешуйки, порошок).

Рис. 1. Традиционная технология диспергирования (экстракции) расплава из керамического тигля

Наиболее производительными способами изготовления металлов и сплавов с аморфной и микрокристаллической структурой являются способы сверхбыстрой закалки из жидкого состояния. Широко распространен способ экстракции (диспергирования) из расплава быстрозакаленного металла вращающимся диском-холодильником (рис. 1) [1]. В результате получают продукцию в виде чешуек, иголок, коротких лент.

Для накопления объема расплава используют керамический тигель с резистивным или индукционным нагревом. Поскольку экстракцию выполняют сверху, то организовать подпитку ванны и стабильный уровень расплава осуществить достаточно сложно, обычно это компенсируют за счет большого поперечного сечения тигля.

Снижение уровня расплава при экстракции ниже какого-то критического размера приводит к попаданию расплава на стенки тигля, а не в накопительный бункер. Это приводит к кратковременности процесса, применение керамического тигля также накладывает ограничения на обрабатываемые составы сплавов. Взаимодействие расплава с керамическим тиглем способствует его загрязнению неметаллическими соединениями, что делает практически невозможным обработку сплавов, содержащих высокореакционные металлы.

В настоящее время возник интерес к получению сплавов с аморфной и микрокристаллической структурой с более высокой температурой плавления и реакционной активностью, для которых плавка в керамическом тигле уже недопустима. К ним

© В. А. ШАПОВАЛОВ, И. В. ШЕЙКО, Ю. А. НИКИТЕНКО, 2009

Таблица 1. Диспергирование при ИПСК

Марка сплава	Массовая доля элементов, %						
	Fe	Al	Ni	Cr	Ti	Mn	$T_{пл}$, °C
Д16	0,3	Основа	Cu = 4,2	–	Mg = 1,6	0,7	660
ЭП 648	Mo = 2,4	1,06	Основа	31,6	W = 4,4	0,3	1550
Нитинол	–	–	»»	–	49,1	–	1550
ВТ1-0	0,2	–	–	–	Основа	–	1660
Nd–Fe–B	Основа	–	Nd = 33,8	–	B = 0,9	–	1550
RSR	Mo = 13,2	7,50	Основа	–	W = 3,6	–	1350

относятся сплавы, содержащие титан, цирконий, хром и др. Кроме того, существует проблема уменьшения неметаллических включений в специальных сплавах для электронной и авиакосмической отраслей промышленности. Для решения поставленной задачи необходимо создание технологических процессов, максимально защищающих расплав от контакта с инородными материалами.

В ИЭС им. Е. О. Патона создана лабораторная установка для получения быстрозакаленных металлов и сплавов на базе существующей установки для индукционной плавки в секционном кристаллизаторе (ИПСК) с диаметром кристаллизатора 68 мм (рис. 2) [2, 3].

Особенностью реализации процесса диспергирования стало использование при индукционной плавке эффекта отжатия расплава от стенок тигля. В процессе плавления металлический расплав отдавливается от стенок секционного кристаллизатора под действием электромагнитных сил, обусловленных взаимодействием токов, протекающих в секциях кристаллизатора, и токов, индуцируемых в поверхностном слое расплава.

В результате расплав не имеет контакта со стенками кристаллизатора, а ванна своей основой опирается на расходуемую заготовку. Отжатие расплава и непрерывная подача заготовки снизу приводит к поднятию уровня ванны выше индуктора и кристаллизатора, что дает возможность осуществлять процесс диспергирования без препятствий.

Такой способ плавки и диспергирования полностью исключает возможность взаимодействия расплава с любыми инородными материалами. Также в процессе плавки возможно рафинирование расплава путем выдержки металла в жидком состоянии, его перемешивания и использования активных шлаков.

При проектировании модуля для диспергирования рассматривались три следующих варианта: без охлаждения, с охлаждением проточной водой и газовым охлаждением. Первые два не нашли применения из-за технологических трудностей при эксплуатации, поэтому последующие опыты проводили на диске с газовым охлаждением, показавшем удовлетворительную работоспособность [4].

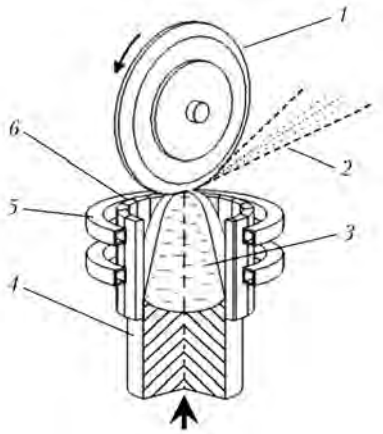

Рис. 2. Схема диспергирования при ИПСК: *1* — диск-холодильник; *2* — быстрозакаленные чешуйки; *3* — расплав; *4* — расходуемая заготовка; *5* — индуктор; *6* — секционный кристаллизатор

Для проведения экспериментов выбраны опытные сплавы, которые сложно, а иногда и невозможно, получать с помощью существующих технологий. В первую очередь это касается сплавов, содержащих высокореакционные элементы, сплавы с высокой температурой плавления, а также модельные сплавы (табл. 1).

Исследования показали, что на форму поверхности ванны расплава, отжимающегося от стенок кристаллизатора, влияет мощность и частота тока высокочастотного генератора. В отличие от классического ИПСК, для осуществления процесса диспер-

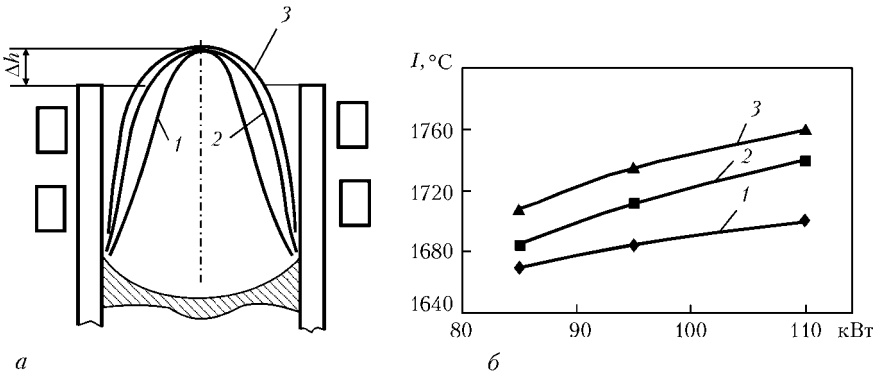

Рис. 3. Отжатая часть металлической ванны в секционном кристаллизаторе (*а*) и ее температура (*б*) в зависимости от частоты тока, кГц: *1* — 2,5; *2* — 8; *3* — 66

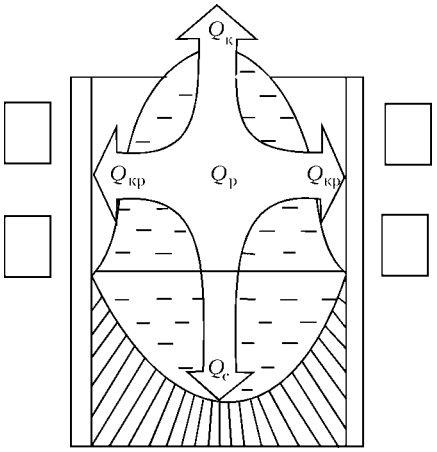

Рис. 4. Потери тепла из расплава при ИПСК

гирования необходимо создание условий для поднятия уровня расплава над секционным кристаллизатором. В результате дей-ствия электромагнитного поля в расплаве возникает интенсивное перемешивание, приводящее к усреднению состава и температуры.

В ходе исследований установлено, что при частоте тока 66 кГц и плавке сплава ВТ1-0 ванна расплава достигает максимального объема и оптимальной формы — купола (рис. 3). Уменьшение частоты способствует образованию конусообразной формы купола, усложняющего процесс перемешивания и, как следствие, охлаждения верхней части расплава, что негативно отражается на диспергировании.

Установлено, что для обеспечения процесса диспергирования высота купола Δh над секционным кристаллизатором должна составлять (0,2… 0,3) D кристаллизатора (около 10… 18 мм). Повышение высоты выпуклого мениска приводило к пространственной нестабильности положения купола, нарушающей процесс диспергирования. Минимальная высота купола Δh, при которой заканчивают процесс диспергирования, составляет (0,1) D кристаллизатора, что равняется 5… 6 мм. Поскольку процесс диспергирования происходит непрерывно или циклически в зависимости от сплава, скорость подачи заготовки регулируется от 0 до 10 мм/мин.

Тепловые режимы работы оборудования в создании технологии имеют решающее значение, влияя на технологию процесса, экономичность и конструкцию основных узлов печи. Таким образом, возникла необходимость их исследования и сравнения с классическим ИПСК. Передача энергии электромагнитного поля, создаваемого током индуктора при ИПСК, происходит по более сложной схеме, чем обычная индукционная плавка.

Таблица 2. Перераспределение тепла в элементах оборудования

Сплав	$Q_{инд}$	$Q_р$	$Q_{кр}$	$Q_к$	$Q_с$
	кВт		%		
Д-16	35… 40	17… 18	70… 75	3… 5	20… 27
ВТ1-0	84… 89	36… 39	80… 82	1… 2	16… 19

Тепловая энергия, выделившаяся в металлической ванне, составляет лишь часть электрической энергии, подведенной к индуктору $Q_{инд}$. Значительная ее часть теряется в секционном кристаллизаторе и индукторе в результате протекания электрического тока в указанных элементах. Проведенные опыты показали, что потери в самом индукторе составляют 16… 17 % мощности.

Суммарные потери в секционном кристаллизаторе являются суммой электрических потерь на передачу энергии и тепла от расплава к стенкам кристаллизатора, составляющих около 50 % общей мощности. Исследование теплового и электрического состояния плавильного модуля показало, что в расплаве выделяется около 50 % мощности индуктора. Перераспределение теплоты, выделившейся в расплаве $Q_р$, осуществляется между стенками кристаллизатора $Q_{кр}$, потерями в глубь расходуемой заготовки $Q_с$, конвективного и лучистого теплообмена с атмосферой камеры $Q_к$ (рис. 4). Исследования показали незначительное перераспределение тепла в элементах оборудования, по сравнению с классическим ИПСК (табл. 2). За счет поднятия уровня расплава над уровнем кристаллизатора на 1… 3 % увеличились потери в окружающую атмосферу камеры.

Особенно сложно осуществить диспергирование сплавов, в состав которых входят высокоактивные элементы, образующие на поверхности металлической ванны плотную пленку. Наличие пленки в значительной мере усложняет, а иногда делает невозможным ведение процесса диспергирования, поскольку она предотвращает прямой контакт металлического расплава с рабочей дорожкой диска-холодильника.

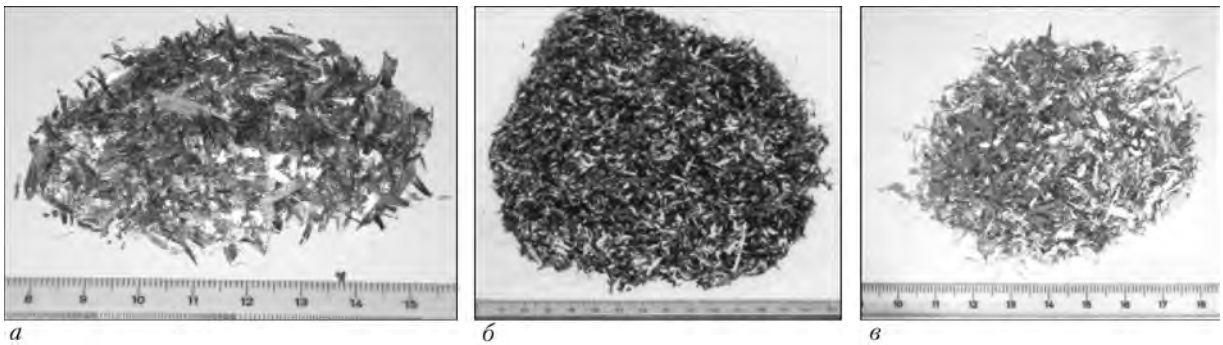

Рис. 5. Общий вид чешуек, полученных диспергированием при ИПСК: *а* — ВТ1-0; *б* — Ni-Ti; *в* — RSR

В результате исследований предложен подход для решения технологической про-блемы очистки поверхности расплава Nd–Fe–B от пленки оксидов с помощью разработанных легкоплавких шлаковых систем на основе фторидов: лития, калия и магния. Для устранения оксидной пленки на поверхности металлической ванны во время диспергирования жаропрочного сплава ЭП 648 и нитинола (Ni–Ti) предложено использование гидрида титана.

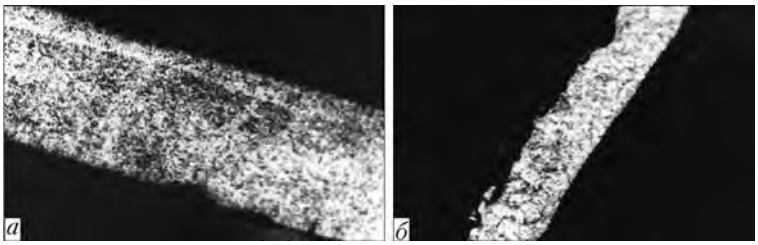

Рис. 6. Микроструктура сечения быстрозакаленных чешуек: *а* — Д16; *б* — ВТ1-0

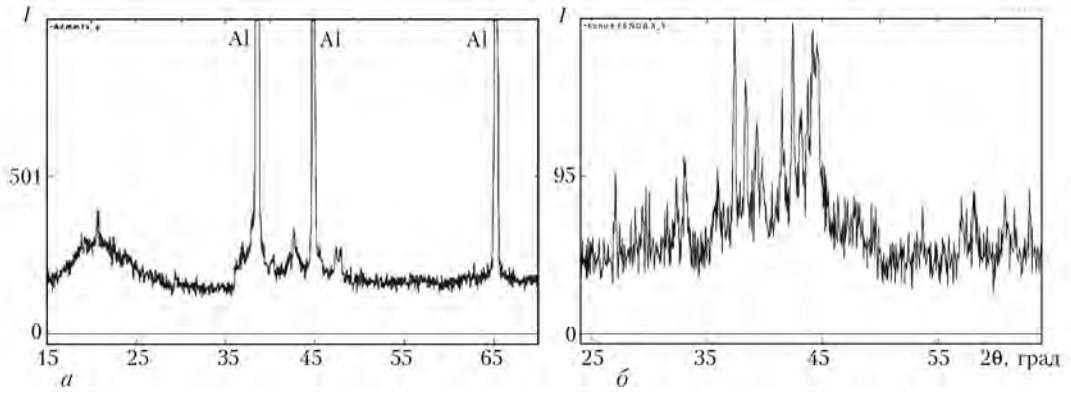

Рис. 7. Рентгенограммы образцов чешуек, полученных при ИПСК: *а* — Д16; *б* — Nd–Fe–B; *I* – интенсивность

Изучение технологических особенностей плавки и диспергирования расплава при ИПСК позволило получать чешуйки из указанных сплавов (рис. 5). Скорость получения чешуек составляет, г/ч: для Д16 ≈ 140…180, для Nd–Fe–B ≈ 300…350, для RSR ≈ ≈ 440…450, Ni–Ti ≈ 500…550, ВТ1-0 ≈ 230…300.

В результате диспергирования получены чешуйки длиной 5…10 мм, шириной 1…2 мм и толщиной 15…50 мкм. Структура чешуек имеет мелкокристаллическое строение (рис. 6), которое объясняется химическим составом обрабатываемых сплавов, т. е. отсутствием элементов — аморфизаторов.

Изучение структуры быстрозакаленных чешуек Д16 показало наличие микрокристаллической структуры с присутствием небольшого количества аморфной фазы. Основу полученных образцов составляет алюминий. Кроме того, присутствуют Al_2Cu, Al_2CuMg, Al_2Mg и более сложные соединения типа $Al_5Cu_6Mg_2$ (рис. 7, *а*).

В процессе исследования чешуек Nd–Fe–B установлено, что в системе непосредственно после сверхбыстрой закалки из расплава также существует аморфно-кристаллическая структура, вмещающая вместе с аморфной составляющей (около 23 %) кристаллические фазы $Nd_2Fe_{14}B$ (рис. 7, б).

В системе Nd–Fe–B возможно формирование множества равновесных и неравновесных фаз. Из-за неполной симметрии их решетки, а также больших значений ее периодов на рентгенограммах этих фаз присутствует большое количество дифракционных пиков. Кроме того, интенсивность данных линий мала и многие из них смещены. Все это чрезвычайно усложняет фазовый анализ быстрозакаленных сплавов системы Nd–Fe–B, а также определение средних размеров кристаллитов.

В ходе металлографических исследований не установлено загрязнение металла посторонними примесями и неметаллическими включениями.

Сверхбыстрая закалка положительно повлияла на функциональные параметры материалов. При изготовлении упругих элементов из прессованого нитинола (сплава с эффектом «памяти» формы) рабочая цикличность повысилась почти на 40 %.

Испытание опытных образцов постоянных магнитов, изготовленных из молотых и спеченных чешуек Nd–Fe–B, показало, что уровень их коэрцитивной силы увеличился более чем в два раза, по сравнению с показателями магнитов, полученных по традиционной технологии.

1. http://www.ifam- dd.fraunhofer.de/fhg/ifam_dd/EN/gebiete/faser/schmelz/index.jsp Dresden branch lab powder metallurgy and composite materials of the fraunhofer institute for manufacturing and advanced materials (IFAM).
2. *Никитенко Ю. А., Шаповалов В. А., Шейко И. В.* Получение аморфных металлов методами специальной электрометаллургии // Современное материаловедение: достижения и проблемы: MMS-2005: Матер. междунар. конф. (Киев, сент. 2005 г.). — Киев: ИПМ им. И. Н. Францевича, 2005. — С. 650–651.
3. *Получение* быстрозакаленных металлических материалов с применением процесса индукционной плавки в секционном кристаллизаторе / Б. Е. Патон, Ю. В. Латаш, И. В. Шейко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1993. — № 2. — С. 50–55.
4. *Шаповалов В. А., Шейко И. В., Никитенко Ю. А.* Некоторые особенности создания устройств для диспергирования металлического расплава // Современ. электрометаллургия. — 2009. — № 2. — С. 35–38.

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

Поступила 01.07.2009

УДК 669.187.58

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ПОЛЯ ИНДУКТОРА НА КОЭФФИЦИЕНТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСИ В КРЕМНИИ

С. Г. Егоров, И. Ф. Червоный, Р. Н. Воляр

Исследован процесс выращивания монокристаллов кремния способом индукционной бестигельной зонной плавки с применением подогревающего индуктора. При помощи математического моделирования установлены параметры электромагнитного поля подогревающего индуктора и определены условия, при которых электромагнитное поле подогревающего индуктора оказывает влияние на условия выращивания монокристаллов.

Process of growing single crystals of silicon by the method of induction crucible-free zonal melting with use of preheating inductor was investigated. Using the mathematical modeling, the parameters of electromagnetic field of phreheating inductor were established and conditions, at which the electromagnetic field of preheating inductor has an influence on the conditions of single crystal growing, were defined.

Ключевые слова: *бестигельная зонная плавка, подогревающий индуктор, электромагнитное поле, эффективный коэффициент распределения примеси*

Введение. Для улучшения условий охлаждения выращиваемого монокристалла кремния способом бестигельной зонной плавки применяют подогревающий индуктор [1, 2]. Значение тока, подаваемого на подогревающий индуктор, меньше поступающего на плавильный индуктор в 5…17 раз. Как правило, частота тока подогревающего индуктора совпадает с таковой тока плавильного индуктора и при выращивании монокристаллов кремния большого диаметра (≥75 мм) способом бестигельной зонной плавки составляет 2,8 МГц. Однако для обеспечения оптимальных тепловых условий выращивания монокристалла частоту тока подогревающего индуктора необходимо снижать [3], поскольку проникающая способность электромагнитного поля при этом возрастает.

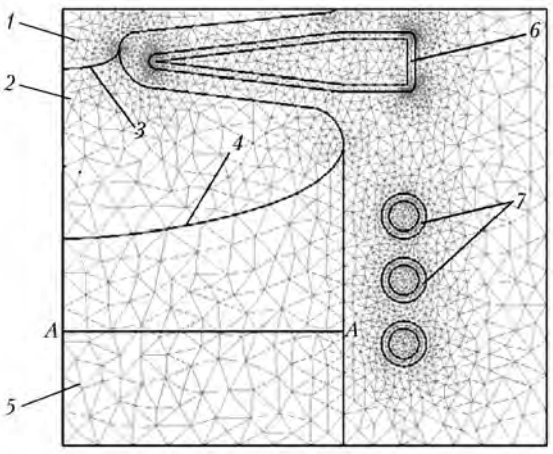

Рис. 1. Геометрическая схема математической модели с нанесенной сеткой конечных элементов: *1* — исходный поликристаллический стержень; *2* — зона расплава; *3* — фронт плавления; *4* — фронт кристаллизации; *5* — монокристалл; *6* — витки подогревающего индуктора; *7* — плавильный индуктор

Цель. Исследовали электромагнитное поле подогревающего индуктора при выращивании монокристаллов кремния способом индукционной бестигельной зонной плавки и его влияние на диффузионный слой вблизи фронта кристаллизации, а также эффективный коэффициент распределения примеси.

Основная часть. Подогревающий индуктор обеспечивает подогрев монокристаллов кремния, являющегося диэлектрическим материалом. Глубину проникновения тока в диэлектрический материал Δ можно определить по следующему уравнению [4]:

$$\Delta = \frac{1}{2\pi f\sqrt{\frac{\mu}{2}}\sqrt{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{тв}}{2\pi f}\right)^2 + \varepsilon^2} - \varepsilon}}, \qquad (1)$$

где $\sigma_{тв}$ — электропроводность твердого кремния, $(Ом\cdot м)^{-1}$; μ — магнитная проницаемость вещества, $\mu \approx 12{,}56\cdot10^{-7}$ Гн/м; f — частота электромагнитного поля, Гц; ε — диэлектрическая проницаемость вещества, $\varepsilon = \varepsilon_{Si}\varepsilon_0 = 1{,}06\cdot10^{-10}$ Ф/м; ε_{Si} — относительная диэлектрическая проницаемость кремния, $\varepsilon_{Si} = 12$; ε_0 — диэлектрическая постоянная, $\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot10^{-12}$ Ф/м.

© С. Г. ЕГОРОВ, И. Ф. ЧЕРВОНЫЙ, Р. Н. ВОЛЯР, 2009

Для уменьшения радиального градиента температуры необходимо обеспечить прогрев большей части выращиваемого монокристалла за счет увеличения проникновения электромагнитного поля. Выполнить эту задачу можно путем снижения частоты тока подогревающего индуктора.

Однако для создания оптимальных тепловых условий выращивания монокристалла требуется максимум объемной удельной мощности, зафиксированный при отношении диаметра монокристалла к глубине проникновения тока $d_{кр}/\delta = 3{,}5$ [4]. Поэтому для диаметра монокристалла $d_{кр} = 150$ мм значение δ составляет 42,86 мм. Для обеспечения заданной глубины проникновения δ частота электромагнитного поля согласно формуле (1) должна составлять $f_р \approx$ $\approx 2{,}35$ кГц ($f_р$ — расчетная частота тока).

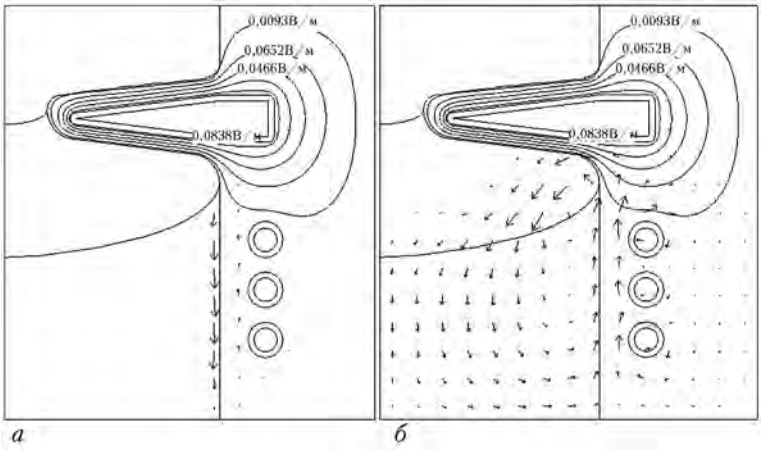

Рис. 2. Электромагнитное поле подогревающего индуктора при различных частотах. Здесь и на рис. 3, 5: *а* — $f_{под} = f_{пл} = 2{,}8$ МГц; *б* — $f_{под} = f_р = 2{,}35$ кГц; контурные линии соответствуют напряженности электрического поля (В/м) плавильного индуктора, а длина стрелок пропорциональна магнитному полю (А/м) подогревающего индуктора)

Для расчета температурного градиента в выращиваемом монокристалле и его зависимости от частоты тока подогревающего индуктора необходимо рассчитать электромагнитное поле, генерируемое подогревающим индуктором при разных частотах.

С целью изучения электромагнитного поля подогревающего индуктора построили математическую модель, в основе которой лежат уравнения Максвелла:

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t, \\ \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j}, \\ \vec{\nabla} \times \vec{B} = 0, \\ \vec{j} = \sigma \vec{E}, \end{cases} \qquad (2)$$

где E — напряженность электрического поля, В/м; B — магнитная индукция, Тл; j — плотность электрического тока, А/м^2.

Решение системы (2) осуществляли путем введения электрического ϕ и векторного магнитного A потенциалов:

$$\vec{E} = -\nabla \phi - \partial A / \partial t,$$
$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}.$$

Расчет мощности, выделяемой в единице объема выращиваемого монокристалла при воздействии электромагнитного поля подогревающего индуктора, осуществляли по следующей формуле [5]:

$$Q = 2\pi f E^2 \varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{tg}\alpha,$$

где $\operatorname{tg}\alpha$ — тангенс угла поглощения. Принимаем $\operatorname{tg}\alpha = 1$.

Для решения поставленной задачи применяли математический пакет «Femlab», реализующий метод конечных элементов. Схема математической модели представлена на рис. 1.

Физические свойства материалов

Параметр	Твердый кремний	Расплав кремния	Медь	Аргон
Электропроводность, $(Ом \cdot м)^{-1}$	$5{,}0 \cdot 10^4$	$1{,}2 \cdot 10^6$	$5{,}99 \cdot 10^7$	–
Относительная диэлектрическая проницаемость	12,1	1,0	1,0	1,0
Плотность, кг/м^3	2330	2530	8950	1,784
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	22	67	400	0,0164
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	703	1000	385	523

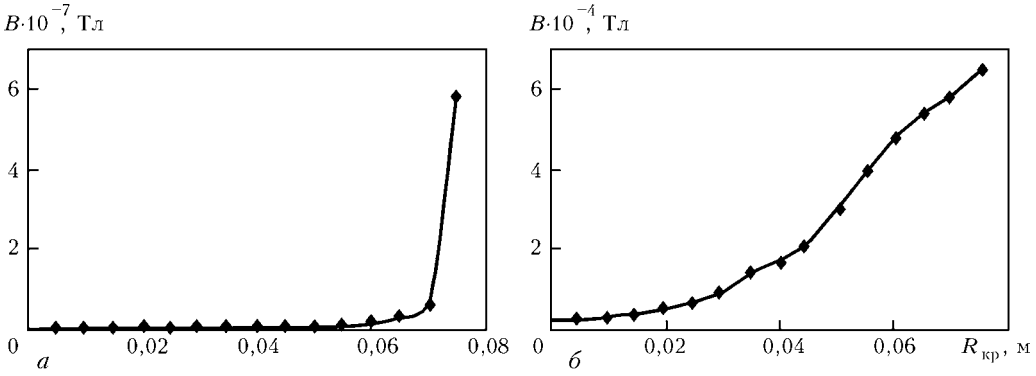

Рис. 3. Распределение индукции B магнитного поля подогревающего индуктора вблизи фронта кристаллизации; $R_{кр}$ — радиус монокристалла

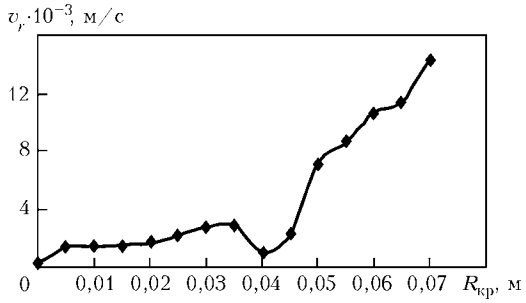

Рис. 4. Скорость движения расплава вблизи фронта кристаллизации при выращивании монокристаллов кремния диаметром 76 мм способом индукционной бестигельной зонной плавки

В рассматриваемой области находятся плавильный индуктор и элементы подогревающего индуктора (рабочая среда — аргон), выращиваемый монокристалл и зона расплава. Ток плавильного индуктора и его частота в расчетах имели следующие значения: $I_{пл}$ = 1700 А и $f_{пл}$ = 2,8 МГц. Отношение тока плавильного индуктора к току подогревающего составляло $I_{пл}/I_{под}$ = 5 [1, 2]. Частоту тока подогревающего индуктора принимали равной $f_{под} = f_р$. Физические свойства рассматриваемых материалов приведены в таблице [6, 7].

Рассчитано электромагнитное поле подогревающего индуктора (рис. 2), а также распределение его магнитной индукции вблизи фронта кристаллизации для различных значений рабочей частоты тока (рис. 3).

Согласно работе [8], влияние электромагнитного поля на толщину диффузионного слоя можно оценить по следующему выражению:

$$\frac{\delta_В}{\delta} = \frac{Ha}{\sqrt{\mathrm{Re}}}, \qquad (3)$$

где $\delta_В$ — толщина диффузионного слоя при наличии электромагнитного поля, м; δ — толщина диффузионного слоя без электромагнитного поля, м; Ha — критерий Гартмана

$$Ha = BR_{кр}\sqrt{\frac{\sigma_р}{\rho\nu}}, \qquad (4)$$

где $R_{кр}$ — радиус монокристалла, м; $\sigma_р$ — электропроводность расплава, для расплава кремния $\sigma_р$ = $= 1{,}23 \cdot 10^6$ Ом·м [6]; ρ — плотность расплава, для расплава кремния ρ = 2530 кг/м^3 [6]; ν — кинематическая вязкость расплава, для расплава кремния $\nu = 3{,}5 \cdot 10^{-7}$ м^2/с [6]; Re — критерий Рейнольдса.

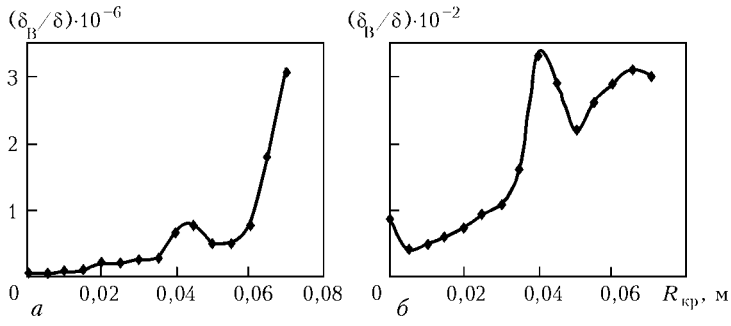

Рис. 5. Изменение толщины диффузионного слоя на фронте кристаллизации при воздействии электромагнитного поля

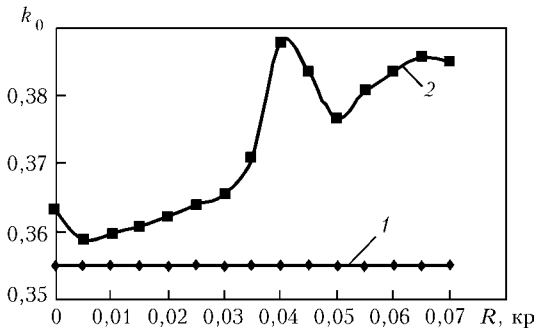

Рис. 6. Расчетное значение эффективного коэффициента распределения примеси на фронте кристаллизации: *1* — f = 2,8 МГц; *2* — f = 2,35 кГц

$$\mathrm{Re} = \frac{\nu R_{кр}}{v_р}, \qquad (5)$$

где $v_р$ — скорость потоков расплава, м/с.

Распределение скорости движения потоков расплава вблизи фронта кристаллизации показано на рис. 4 [9]. Резкое падение скорости движения расплава в средней части объясняется наличием в зоне расплава двух конвекционных ячеек, вращающихся в противоположные стороны. Именно в области их встречи скорость движения расплава уменьшается.

Результаты расчетов, выполненных по формулам (3)–(5), представлены на рис. 5. При снижении рабочей частоты тока подогревающего индуктора увеличиваются степень проникновения электромагнитного поля в зону расплава и его воздействие на диффузионный слой. Это способствует увеличению толщины диффузионного слоя (рис. 5, *а*).

Влияние изменения толщины диффузионного слоя на эффективный коэффициент распределения примеси $k_{эф}$ на фронте кристаллизации определяли по следующей формуле [10]:

$$k_{эф} = \frac{k_0}{k_0 + (1 - k_0)\exp(-f\,\delta_в/D)},$$

где k_0 — равновесный коэффициент распределения примеси, k_0 = 0,35; $v_{кр}$ — скорость выращивания монокристалла, $f = 5 \cdot 10^{-5}$ м/с (3 мм/мин); D — коэффициент диффузии, $D = 1 \cdot 10^{-8}$ м^2/с.

Изменение толщины диффузионного слоя на фронте кристаллизации под воздействием электромагнитного поля влияет на значение эффективного коэффициента распределения примеси (рис. 6). В случае равенства рабочей частоты тока подогревающего и плавильного индукторов электромагнитное поле не оказывает влияния на эффективный коэффициент распределения примеси (рис. 6, кривая *1*). При снижении рабочей частоты тока до уровня $f_р$ обнаружено неравномерное распределение эффективного коэффициента распределения примеси вдоль радиуса монокристалла (рис. 6, кривая *2*). Это дает возможность управлять степенью очистки монокристаллов

кремния от примесей при выращивании их способом индукционной бестигельной зонной плавки.

Выводы

1. Проведенные исследования показали, что снижение частоты тока подогревающего индуктора дает возможность контролировать толщину диффузионного слоя на фронте кристаллизации.

2. Появляется возможность управлять эффективным коэффициентом распределения примеси и, следовательно, степенью очистки монокристаллов от примесей в процессе их выращивания.

1. *Бронникова Л. П., Добровольская В. И., Ратников Д. Г.* Определение температурных градиентов в слитках кремния при бестигельной зонной плавке // Промышленное применение токов высокой частоты: Тр. ВНИИ ТВЧ. — 1974. — Вып. 14. — С. 65–74.
2. *Добровольская В. И., Ратников Д. Г.* Исследование индукционных систем вертикальной бестигельной зонной плавки // Там же. — 1974. — Вып. 14. — С. 78–85.
3. *Егоров С. Г., Червоный И. Ф., Колобов Г. А.* Анализ влияния магнитного поля подогревающего индуктора на расплавленную зону при БЗП // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов: Сб. докл. 4-й междунар. науч.-техн. конф. (Харьков, 19–23 мая 2003 г.) — Харьков, 2003. — С. 320–323.
4. *Глуханов Н. П.* Физические основы высокочастотного нагрева. — Л.: Машиностроение, 1979. — 64 с.
5. *Высокочастотная* электротермия: Справочник / Под ред. А. В. Донского. — М.: Машиностроение, 1965. — 564 с.
6. *Numerical* study of transient behavior of molten zone during industrial FZ process for large silicon crystal growth // J. Cryst. Growth. — 2004. — V. 266. — P. 54–59.
7. *Interface* shape, heat transfer and fluid flow in the floating zone growth of large silicon crystals with the needle-eye technique // Ibid. — 1995. — V. 151. — P. 66–79.
8. *Выращивание* полупроводниковых монокристаллов с электромагнитным воздействием на расплав / Ю. М. Гельфгат, В. С. Земсков, М. Р. Раухман, М. З. Соркин // Процессы роста полупроводниковых кристаллов и пленок. — Новосибирск: Наука, 1988. — 300 с.
9. *Muehlbauer A., Muznieks A., Raming G.* System of mathematical models for the analysis of industrial FZ-Si-crystal growth processes // Cryst. Res. Technol. — 1999. — V. 34. — P. 217–226.
10. *Мюллер Г.* Выращивание кристаллов из расплава. Конвекция и неоднородности / Пер. с англ. — М.: Мир, 1991. — 143 с.

Гос. инж. акад., Запорожье

Поступила в редакцию 07.10.2008

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ

Объявляет ежегодный набор по следующим специальностям:

ДОКТОРАНТУРА

- сварка и родственные технологии
- автоматизация технологических процессов
- металловедение и термическая обработка металлов
- металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

АСПИРАНТУРА

- сварка и родственные технологии
- автоматизация технологических процессов
- металловедение и термическая обработка металлов
- металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

Прием документов проводится в сентябре.
Контактный телефон: 289-84-11.
Подробная информация на сайте института (раздел аспирантура): www: paton.kiev.ua

Документы направлять по адресу:
03680, Украина, Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 11,
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ученому секретарю

УДК 621.793.18.06

МОДИФИЦИРОВАННАЯ ВАКУУМНО-ДУГОВАЯ УСТАНОВКА «БУЛАТ-3Т»

А. В. Демчишин, В. А. Миченко, Г. А. Автономов, О. А. Токарев

Представлены данные относительно выполненных изменений в конструкции вакуумно-дуговых испарителей металлов, электрической схеме привода вращения подложек, откачном оборудовании установки и улучшении защиты фланцев, смотровых систем от тепловых нагрузок с целью обеспечения осаждения функциональных покрытий на длинномерные изделия и формирования многослойных конденсатов с микро- и наноструктурой общей толщиной до 100 мкм и больше.

Data are presented as regards to changes made in the design of vacuum-arc evaporators of metals, electrical diagram of drive of substrates rotation, pumping equipment of the installation and improvement of protection of flanges, viewing window systems from heat loads to provide the deposition of functional coatings on long products and formation of multi-layer condensates with a micro- and nanostructure of total thickness of up to 100 μm and higher.

Ключевые слова: *вакуумная дуга; торцевой цилиндрический катод; планарный катод; привод вращения подложек; реле времени; многослойное покрытие*

Появление источников низкотемпературной плазмы на основе катодной формы вакуумной дуги, развивающейся в парах материала эродирующего электрода, открыло большие возможности для формирования функциональных покрытий с разными свойствами на поверхности подложек. Такая ситуация предопределила разработку оборудования с использованием дугового разряда в вакууме для нанесения ионно-плазменных покрытий на детали ответственного назначения. Анализ серийного вакуумно-дугового оборудования для осаждения покрытий, изготовляемого ведущими фирмами в области вакуумного машиностроения, показал, что наиболее распространенным типом катодно-дугового источника являются испарители с цилиндрическими катодами, где дуговой разряд осуществляется на торцевой поверхности отрицательного электрода. Испарители такого типа используют в серийных установках «Булат» (Украина), ННВ-6.6, «Пуск», ИЭТ (Россия), ВУ-1БС, ВУ-2МБС (Белоруссия), MR-333, MR-383 (США), BAI-1200 (Лихтенштейн). В данных испарителях внешняя электромагнитная система удерживает катодные пятна на торцевой поверхности катода и вращает их с высокой скоростью по круговым орбитам на указанной поверхности. Такие источники генерируют неоднородный, ограниченный определенными размерами, плазменный поток, что сужает возможности их практического применения. В этом случае максимальная скорость осаждения пароплазменного потока зафиксирована вблизи оси катода в пределах небольших телесных углов.

Однако для современного машиностроения зачастую требуется обработка длинномерных и крупногабаритных изделий, для чего необходимо получение равномерного в продольном сечении плазменного потока, что не всегда возможно посредством увеличения количества отдельных точечных источников катодно-дуговой плазмы. В связи с этим одной из актуальных проблем является создание и использование планарных электродуговых испарителей.

Кроме того, целесообразнее изготовлять катоды в виде пластин, вырезаемых из листового проката, а не сплошных цилиндров, особенно при использовании катодов больших размеров. Для этого вместо точечных электродуговых испарителей разработаны, изготовлены и установлены в установке «Булат-3Т» источники металлической плазмы планарного типа с магнитным удержанием катодных пятен на рабочей поверхности катода, испытания которых

© А. В. ДЕМЧИШИН, В. А. МИЧЕНКО, Г. А. АВТОНОМОВ, О. О. ТОКАРЕВ, 2009

показали, что катодные пятна перемещаются по эллиптической траектории вдоль продольной оси катода. Повышение тока дугового разряда способствует увеличению катодных пятен и скорости их перемещения на рабочей поверхности катода и, в результате, возрастанию скорости эрозии катодного материала.

На рис. 1 представлены фотографии катодных пятен на поверхности титанового планарного катода, образовавшихся при разных значениях тока дугового разряда. Приведенные данные свидетельствуют об увеличении плотности катодных пятен в случае роста разрядного тока. После полной выработки планарный катод имеет корытоподобную форму и высокий коэффициент использования материала катода.

Особенностью указанных испарителей является снижение уровня порогового тока, выше которого обеспечивается стабильная работа дугового разряда, что подтверждают и другие исследователи [1].

Установка «Булат-3Т» состоит из вакуумной камеры, привода вращения стола с подложкодержателями, пульта управления, блоков электропитания (выпрямителей тока) и откачного оборудования [2]. Вакуумная камера имеет форму горизонтального цилиндра с двумя загрузочно-разгрузочными торцевыми отверстиями, герметично закрываемыми круглыми крышками с фланцами, на которых установлены катодные узлы для испарения электропроводных материалов, смотровые системы и окна для дистанционного контроля температуры подложек с помощью пирометра. В нижней части камеры находится узел вращения стола, ось которого через вакуумный ввод соединена с электрическим приводом, обеспечивающим скорость вращения 8 об/мин. Указанный стол изолирован от корпуса камеры.

Для получения необходимого вакуума в рабочей камере использовали комбинированную откачную систему, в которой для начальной откачки воздуха из камеры задействован форвакуумный механический насос 2НВР-5Д с масляным уплотнением и высоковакуумный паромасляный насос АВП-250-630. Для повышения скорости откачки воздуха из камеры на начальной стадии с целью значительного сокращения длительности процесса и уменьшения граничного остаточного давления к откачному посту добавлен двухроторный насос ДРН-50 с прифланцованным электродвигателем. Использование дополнительного насоса ДРН-50 значительно повышает коэффициент сжатия и снижает до минимума эффект уменьшения граничного давления механического насоса с масляным уплотнением даже в случае ухудшения качества масла.

Электрическая система включает источники питания дуговых испарителей и источники высокого и опорного напряжения, подаваемого на подложки. Для получения многослойных конденсатов с микро- и нанокристаллической структурой использовали режим непрерывного испарения выбранных металлов из двух катодов в совокупности с переменным

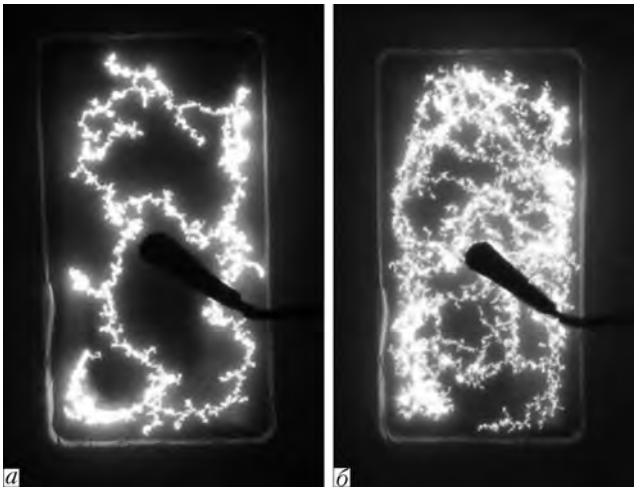

Рис. 1. Катодные пятна на поверхности титанового планарного катода при $I_д$, А: *а* — 100; *б* — 140

циклическим вращением подложек. Осаждение плазменных потоков на подложки с контролируемой длительностью их нахождения напротив испаряемых катодов, обеспечивали путем добавления к электрической схеме привода вращения реле времени, что позволило получать многослойные конденсаты с толщиной субслоев в пределах 10…1000 нм и общей толщиной до $1 \cdot 10^5$нм.

На рис. 2 приведена типичная структура многослойного TiN/ZrN покрытия с толщиной субслоев 100 нм и общей толщиной $15 \cdot 10^3$нм, полученного с помощью указанной техники. Формирование конденсатов нитридов титана и циркония осуществляли в азотной газовой среде в диапазоне давлений

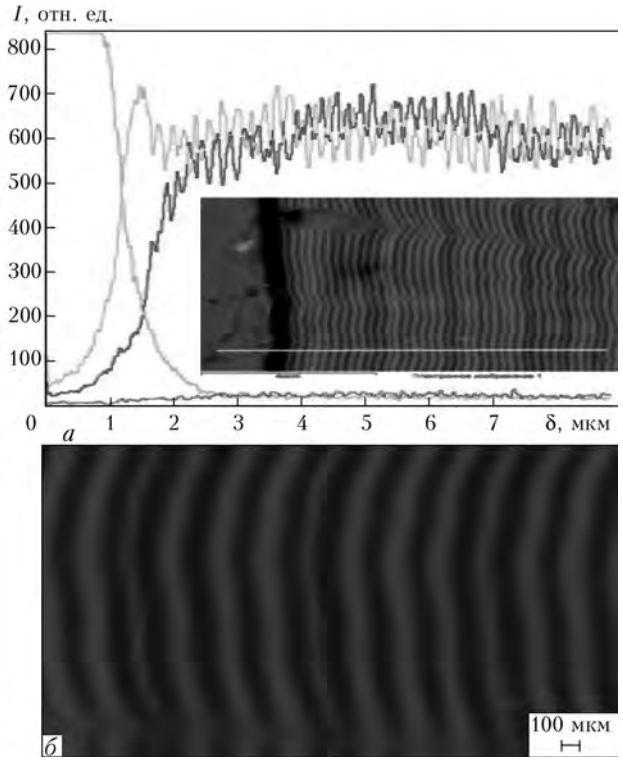

Рис. 2. Распределение элементов покрытия по толщине многослойного конденсата TiN/ZrN (*а*) и его структура в поперечном сечении (*б*); *I* — интенсивность

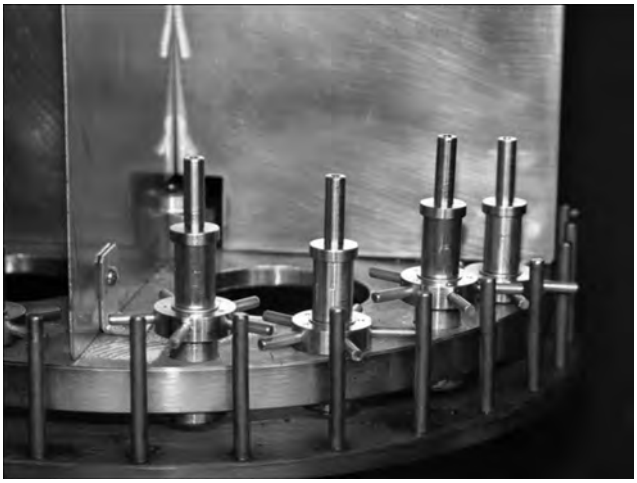

Рис. 3. Четвертая часть стола с подложкодержателями планетарного типа

$(4...6)10^{-1}$Па. Ток разряда составлял 110 А, а отрицательный потенциал смещения на подложке достигал −150 В. Расстояние между подложками и катодами равнялось 125 мм. Подложками служили твердосплавные пластинки из ВК6 и Т5К10. Установка коромысла в виде горизонтального молибденового стержня на валу механизма вращения позволила легко регулировать расстояние между подложками и рабочей поверхностью катодов.

Кроме того, разработан, изготовлен и установлен стол с подложкодержателями планетарного типа, с помощью которого можно осаждать одно- и многослойные покрытия на детали фасонного типа.

На рис. 3 показана четвертая часть держателей осесимметричных подложек, вращающихся вокруг своей оси и одновременно со столом, крутящимся вместе с вертикальними экранами. Это дает возможность проводить многоразовое последовательное осаждение разных покрытий на детали цилиндрического типа.

Для равномерного нагрева маломерных и тонкостенных изделий, установленных на подложкодержателях, до и в процессе нанесения на них покрытий изготовлен ленточный танталовый электрический нагреватель, крепящийся к верхнему фланцу рабочей камеры установки с помощью водоохлаждаемых медных электрических вводов.

Для дополнительного влияния на адгезию, структуру и другие свойства осаждаемых покрытий предусмотрено использование высоковольтного импульсного генератора, обеспечивающего подачу на подложки в ходе нанесения покрытий отрицательных импульсов напряжения с амплитудой до 5 кВ, длительностью импульсов 15, 35, 55 мкс и паузами между импульсами соответственно 30, 70, 110 мкс.

В связи с необходимостью осаждения функциональных покрытий толщиной до $1 \cdot 10^5$ нм и больше, для чего требуется длительная работа установки в условиях функционирования катодно-дуговых испарителей при максимальных режимах, значительно увеличивается тепловая нагрузка на внутрикамерные узлы и устройства. Вакуумная камера серийной установки охлаждается проточной водой в процессе нанесения покрытий, в отличие от фланцев и смотровых отверстий камеры, что вызывает перегрев последних. В связи с этим внутри камеры установили металлические экраны напротив проблемных мест. Кроме того, реконструирован нижний механизм вращения с вакуумным вводом с целью обеспечения охлаждения его вала проточной водой. Дозированный напуск и поддержка заданного расхода аргона и азота осуществляется газовой системой с использованием натекателя игольчатого типа при помощи блока управления натекателя.

Указанные усовершенствования в совокупности позволили существенно расширить технологические возможности установки и осаждать функциональные покрытия с контролируемой структурой на подложки широкого профиля.

Выводы

1. Разработанные электродуговые испарители планарного типа, изготовленные из титана и предназначенные для осаждения равномерных по толщине покрытий на длинномерные подложки, прошли успешные испытания в рабочей камере установки «Булат-3Т».

2. Использование реле времени в электрической схеме привода вращения подложек дало возможность получать многослойные покрытия с микро- и нанокристаллической структурой.

3. Использование поворотного стола планетарного типа с подложкодержателями позволило осаждать многослойные покрытия на фасонные изделия.

4. Наличие электрического нагревателя ленточного типа дало возможность осуществлять радиационный однородный нагрев разнотолщинных изделий.

5. Полученные результаты будут использованы для разработки новой промышленной вакуумно-дуговой установки для осаждения функциональных покрытий на длинномерные детали ответственного назначения.

1. *Электродуговой* испаритель металлов с магнитным удержанием катодного пятна / Л. П. Саблев, Ю. И. Долотов, Р. И. Ступак, В. А. Осипов // Приборы и техника экспериментов. — 1976. — № 4. — С. 247–249.
2. *Структура* и свойства покрытий из Ti, Ti36Al, Ti/Al, полученных способом вакуумно-дугового испарения / А. В. Демчишин, В. С. Голтвяница, С. К. Голтвяница и др. // Современ. электрометаллургия. — 2009. — № 2. — С. 42–47.

Ин-т проблем материаловедения им. И. Н. Францевича,
НАН Украины, Киев

Поступила 03.02.2009

УДК 669.187.526.001.57

ПЕРЕРАБОТКА СТРУЖКИ ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ ЭП609-Ш СПОСОБОМ КОМПАКТИРОВАНИЯ ПОД ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫМ ПЕРЕПЛАВОМ

В. А. Шаповалов, В. Р. Бурнашев, Ф. К. Биктагиров, А. И. Украинец, М. А. Брагин, В. Н. Пудиков, В. С. Константинов, В. В. Степаненко, А. Н. Пешков

Предложен способ компактирования стружки в проходной матрице в сочетании с электронагревом. Показано, что данным способом можно получать длинномерные изделия, пригодные для использования в качестве расходуемых электродов для процессов спецэлектрометаллургии. Установлено, что качество выплавленного из них металла находится в пределах нормы.

Method of compacting in a leading-through matrix in combination with electric heating has been offered. It is shown that this method allows producing long products, suitable as consumable electrodes for the processes of special electrometallurgy. It was found that the quality of metal, produced of them, is on the level of standard.

Ключевые слова: *компактирование; электронагрев; утилизация; некомпактные металлические отходы; металлическая стружка; расходуемый электрод*

Спрос на легированные марки сталей стабильно увеличивается в среднем на 5…6 % в год. Согласно различным литературным источникам, производство нержавеющих марок стали колеблется от 27,8 до 28,2 млн т в год.

В среднем коэффициент использования нержавеющих сталей на металлообрабатывающих предприятиях составляет 0,5…0,7, остальное идет в отходы, большую часть которых составляет стружка.

Проблема утилизации металлической стружки до сих пор полностью не решена, а непосредственное ее использование связано с рядом следующих трудностей: загрязнением смазывающей охлаждающей жидкостью (СОЖ) — после механической обработки, большим угаром при переплаве, низкой насыпной плотностью, отсутствием эффективной техники и технологии перегрузки при транспортировании и загрузке переплавных печей. Способ компактирования стружки является очень эффективным и позволяет приблизить плотность спрессованного материала до 0,5…0,8 плотности литого металла.

Существует несколько способов компактирования материалов: гидростатическое холодное прессование, электроимпульсный способ прессования, взрывной, спекание, штамповка, прокатка. Однако все они имеют недостатки при прессовании в закрытой матрице (малая длина полученной прессовки, недостаточная прочность заготовки при холодном прессовании, невысокая плотность брикета при импульсивном компактировании [1–4]). Получение прессовок массой более 15 кг затруднительно и связано с использованием мощных прессов с удельным давлением прессования свыше 500 МПа. А это крупногабаритное и дорогостоящее оборудование.

Однако существующие способы не позволяют эффективно перерабатывать стружку, особенно это касается стружки жаропрочных сталей и ряда других высоколегированных сплавов.

Данная проблема может быть решена путем совмещения процесса прессования с нагревом, что позволит повысить пластичность стружки и уменьшить усилия прессования. В ИЭС им. Е. О. Патона разработаны способ и опытно-промышленная установка для компактирования шихты способом полунепрерывного горячего прессования (рис. 1).

Компактирование стружки одновременно с прямым электронагревом производят в проходной матрице специальной конструкции. В отличие от других схем ведения процесса, принципиально изменена схема установки. Она оснащена механизмом вытягивания прессовки, а кроме того, разработана новая конструкция нижнего токоподвода. Если обычно токоподвод в установках по прессованию брике-

© В. А. ШАПОВАЛОВ, В. Р. БУРНАШЕВ, Ф. К. БИКТАГИРОВ, А. И. УКРАИНЕЦ, М. А. БРАГИН, В. Н. ПУДИКОВ, В. С. КОНСТАНТИНОВ, В. В. СТЕПАНЕНКО, А. Н. ПЕШКОВ, 2009

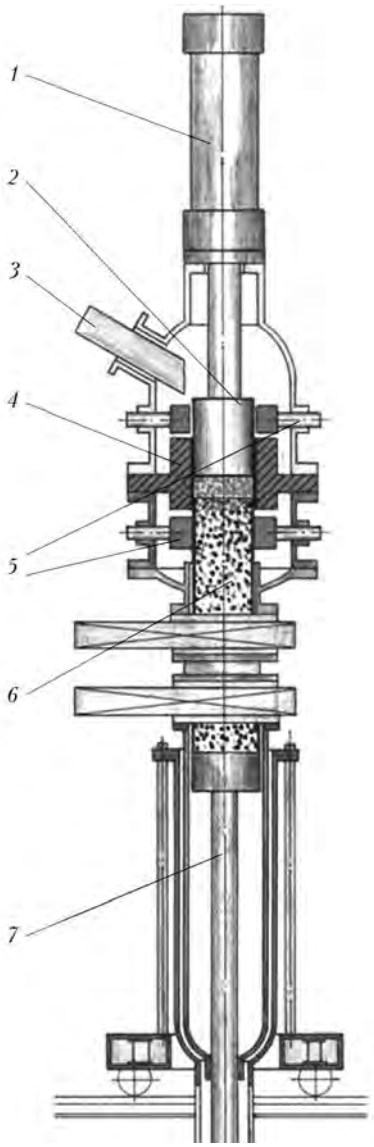

Рис. 1. Схема установки для компактирования: *1* — гидроцилиндр; *2* — пуансон; *3* — лоток для подачи стружки; *4* — матрица; *5* — токоподводы; *6* — скомпактированная заготовка; *7* — шток

тов подсоединяют к днищу матрицы, то в разработанной установке ток подводят непосредственно к боковой поверхности формируемой заготовки или к затравке (в стартовый период).

Процесс осуществляется при относительно невысоких усилиях прессования (2,5 МПа), что значительно сокращает стоимость оборудования. Компактирование стружки выполняют следующим образом: в матрицу подается стружка стали ЭП609-Ш фракции не более 70… 80 мм массой до 1 кг. Затем стружка сжимается пуансоном. Через токоподводы поступает ток 10… 12 кА при напряжении 7… 12 В. Стружка за счет джоулева тепла, выделяемого при

Рис. 2. Заготовка, скомпактированная из стружки жаропрочного сплава ЭП609-Ш

Рис. 3. Слиток, выплавленный из скомпактированной стружки

прохождении тока, разупрочняется. В этот момент происходит сдавливание пуансоном стружки до минимального объема. Длительность компактирования одной порции составляет 25 с. Затем загружается следующая порция стружки и процесс повторяется.

При прохождении тока в объеме прессуемой стружки, а также между прессуемой и спрессованной порциями возникают микродуги. В момент сдавливания жидкая фаза распространяется по объему порции и между порциями, замоноличивая спрессованную заготовку. В течение всего процесса прессования происходит вытягивание спрессованной стружки, что позволяет получать длинномерные заготовки.

В ходе экспериментов получили заготовки длиной 1000 мм, диаметром 100 мм и плотностью образца 4,25… 5,00 г/см^3 (54,5… 64 % плотности литого металла). Исследования влияния гранулометрического состава стружки на качество спрессованной заготовки показали, что с уменьшением размеров стружки до 40… 50 мм не только увеличивается плотность спрессованной заготовки, но и повышается ее прочность. Полученные спрессованные заготовки (рис. 2) использовали в качестве расходуемых электродов при электрошлаковой выплавке слитков в агрегате типа А550.

Переплав спрессованной заготовки из стружки ЭП609-Ш производили в глуходонном кристалли-

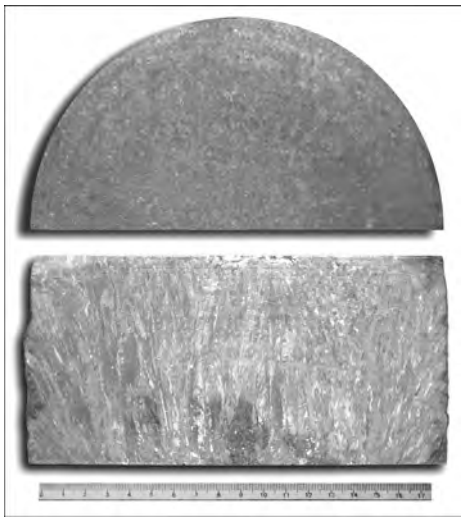

Рис. 4. Макроструктура слитка ЭШП сплава ЭП609-Ш

Таблица 1. Механические свойства стали ЭП609-Ш при комнатной температуре

Образец слитка	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5, %	ψ, %	KCV, Дж/см^2	$D_{отп}$, мм	HB	Длительная прочность		
								T, °С	σ, МПа	τ, ч
В	990	862	18	51	71,54…61,74	3,4	321	400 400	657 657	100 100
С	960	872	18	58	85,26…96,04	3,3	341	400 400	657 657	100 100
И 255.105.092–87, ЭП609-Ш	≥ 755	≥ 676	У 6	У 34	У 44,1	3,3…3,8	341…255	400	657	У 100

Примечание. Направление вырезки всех образцов — поперечное; $D_{отп}$ — диаметр отпечатка.

Таблица 2. Химический состав стали ЭП609-Ш

Образец	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb	V
В1	0,084	0,55	0,30	0,03	0,002	10,96	0,39	1,61	0,07	0,22
В2	0,088	0,52	0,30	0,03	0,002	10,98	0,39	1,61	0,07	0,22
С1	0,088	0,39	0,29	0,03	0,002	10,81	0,4	1,63	0,07	0,21
С2	0,086	0,42	0,29	0,03	0,002	10,95	0,4	1,64	0,06	0,22
И 255.105.092–87, ЭП609-Ш	0,09…0,05	≥ 0,6	У 0,6	У 0,03	У 0,020	10,5…12,0	0,35…0,50	1,4…1,8	0,05…0,15	0,15…0,25

заторе с жидким стартом. В качестве шлака применяли смесь АНФ-6 с флюоритовым концентратом. В процессе переплава поддерживали следующий режим: I = 1,5…2,0 кА, U = 35…36 В. В результате выплавлены слитки диаметром 175 мм, высотой 175…250 мм и массой от 32 до 42 кг (рис. 3).

Металлографические исследования темплетов, вырезанных из слитка стали ЭП609-Ш в поперечном (рис. 4, *а*) и продольном (рис. 4, *б*) направлениях показали, что металл плотный и видимых дефектов не имеет. Исследования механических свойств металла проведены в условиях НПО «Заря-Машпроект», г. Николаев.

Для определения механических свойств вырезали образцы из верхней *В* и средней *С* частей слитка в поперечном направлении и подвергали их термообработке по следующему режиму: закалка (1030±10) °С; 60…80 мин, масло; отпуск (650±20) °С; выдержка 60…100 мин, воздух. После термообработки провели механические испытания образцов при комнатной температуре и на длительную прочность (табл. 1). Исследования показали, что механические свойства слитка стали ЭП609-Ш, выплавленного из электродов, спрессованных из 100 % стружки, удовлетворяют требованиям И 255.105.092–87 для сплава ЭП609-Ш. Химический состав выплавленного металла определяли на ударных образцах (табл. 2). Как свидетельствуют данные табл. 2, распределение элементов в поперечном и продольном направлениях слитка равномерное и соответствует требованиям И 255.105.092–87 для химического состава слитков ЭП609-Ш.

Таким образом, установлено, что новая технология позволяет эффективно утилизировать некомпактные металлические отходы, способствует повышению рентабельности производства.

Кроме того, использование указанного способа дает возможность компактировать стружку или шихту различных видов легковесного металлолома (листовая обрезь, проволока, порошки) из разнообразных металлов и сплавов (в том числе и их смесей) с целью получения электродов для переплавных процессов специальной металлургии [5].

Выводы

1. Показано, что способом компактирования под электрическим током можно получать компактные длинномерные заготовки и использовать их в качестве электродов для процессов спецэлектрометаллургии.

2. Разработана технологическая схема получения слитков стали ЭП609-Ш из стружки.

3. Установлено, что качество слитка, полученного способом электрошлакового переплава скомпактированных заготовок из стружки стали ЭП609-Ш, соответствует требованиям И 255.105.092–87.

1. *Абрамова К. Б., Самуилов С. Д.* Метод брикетирования металлической стружки // Рынок вторичных металлов. — 2005. — 2/28. — С. 50–54.
2. *Степанов С. И.* Исследование процесса горячего прессования и свойств деталей из стальной стружки: Автореф. дис. … канд. техн. наук. — Киев, 1967. — 22 с.
3. *Получение* расходуемых электродов компактированием титановой губки под током / М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, В. С. Константинов и др. // Современ. электрометаллургия. — 2005. — № 3. — С. 64–67.
4. *Дорофеев Ю. Г.* Динамическое горячее прессование пористых материалов. — М.: Наука, 1968. — 120 с.
5. Пат. 7997 Україна, МПК С22 В 1/248. Спосіб компактування металевої шихти / Б. Є. Патон, М. Л. Жадкевич, В. О. Шаповалов та інш. — Опубл. 10.08.2007; Бюл. № 12.

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

Поступила в редакцию 18.05.2009

11-я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ в САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

14–17 апреля 2009 г. в Санкт-Петербурге состоялась 11-я Международная научно-практическая конференция «Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструментов и технологической оснастки от нано- до макроуровня», организаторами которой были научно-производственная фирма «Плазмацентр» и Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Эта традиционная ежегодная конференция проводится с 1997 г. и является самой крупной в России и странах СНГ по данной тематике. Она посвящена промышленным технологиям, способным в момент экономического кризиса обеспечить максимальное сокращение издержек и повысить эффективность производства.

В работе конференции приняли участие около 450 человек, представляющих различные предприятия и организации России, Белоруссии, Украины, Казахстана, Азербайджана, Молдавии, Армении, Узбекистана, Литвы, Польши, Кореи. Генеральным информационным спонсором конференции стало ООО «Издательство Машиностроение». Информационную поддержку оказывали более 50 периодических научно-технических журналов.

Работа конференции велась по четырем следующим направлениям:

технологии восстановления первоначальной (заданной) геометрии поверхности с использованием сварки, наплавки, напыления и других процессов (41 доклад);

инженерия поверхности, конструкционные и эксплуатационные методы повышения надежности и долговечности, триботехника, обработка поверхности изделий (29 докладов);

технологии упрочнения, модификация и восстановление физико-механических свойств поверхности, нанесение тонкопленочных покрытий (62 доклада);

технологии диагностики, дефектации, мойки и очистки (25 докладов).

Во вступительном слове генеральный директор НПФ «Плазмацентр» П. А. Тополянский отметил, что в России и странах СНГ проводимая в Санкт-Петербурге конференция является наиболее значимой и крупномасштабной. На ней присутствуют не только специалисты, ученые и преподаватели вузов — разработчики технологий ремонта, восстановления и упрочнения, но и представители промышленности — непосредственные потребители данных

технологий, приезжающие из разных уголков России и стран СНГ. Здесь осуществляется прямое общение разработчика и непосредственного потребителя инновационных проектов. Именно диалогом и обменом опыта славятся эти конференции, основная цель которых — популяризация технологий, получение новых, способных создавать надежную и конкурентоспособную продукцию, пропаганда новых знаний, способствующих повышению качества, надежности и долговечности выпускаемых и эксплуатируемых технических изделий. Особенностью проводимых конференций является их практическая направленность, возможность нахождения исполнителей для внедрения процессов ремонта, восстановления и упрочнения, демонстрация и проведение вместе с участниками нанесения износостойких покрытий на изделия, привезенные с собой. Данная конференция имеет большое воспитательное значение, поскольку на ней присутствуют аспиранты и студенты, выбравшие в качестве своей будущей трудовой деятельности инженерное творчество.

На конференции заслушано около 50 пленарных докладов. Каждая организация, представившая доклад, отмечена почетным дипломом.

Следует отметить возросший объем исследований и новых эффективных разработок, выполненных в различных вузах и имеющих практическую направленность. Комплексный подход к решению проблем может быть проиллюстрирован, например, разработкой Санкт-Петербургского аграрного университета совместно с Брянской сельскохозяйственной академией технологии дуговой наплавки деталей почвообрабатывающих машин с учетом взаимодействия почвы с наплавленной поверхностью. Наплавка не сплошным слоем, а отдельными полосами по определенной схеме дает возможность по-

высить качество обработки почвы, снизить износ деталей, а также уменьшить расход наплавляемых материалов. Технология может быть использована не только производителями сельхозтехники, но и малыми предприятиями технического сервиса.

Значительное внимание разработчики технологий ремонта и упрочнения уделяют механизации и автоматизации как собственно технологических процессов, так и информационным системам автоматизированного выбора материалов для нанесения покрытий (например, разработка Военно-технического университета, г. Балашиха).

Нельзя не отметить активное участие в конференции представителей отдаленных регионов: Якутска, Магадана, Хабаровска, Читы, Новосибирска и др., представивших интересные разработки на актуальные темы.

На конференции наибольшее количество докладов (62) было посвящено новым ресурсосберегающим технологиям упрочнения поверхности и нанесения тонкопленочных покрытий. Технологии отличаются большим разнообразием и эффективностью. Интересные разработки представили специалисты Белоруссии, Иркутска, Москвы и Санкт-Петербурга. На конференции отмечена актуальность создания безвакуумных технологий получения упрочняющих нанопокрытий.

Традиционно для участников конференции организовано посещение промышленных участков по восстановлению и нанесению функциональных покрытий с использованием технологий газотермического напыления, наплавки и упрочнения. Участникам продемонстрировали в работе новый процесс финишного плазменного упрочнения с нанесением алмазоподобного покрытия, способный за несколько минут обработки изделий многократно повысить их стойкость, технологию плазменной наплавки-напыления (РТА-процесс). Во время работы конференции производилось упрочнение привезенного участниками инструмента и технологической оснастки.

На выставочных площадях участникам конференции демонстрировали новое поколение оборудования, разработанное специалистами НПФ «Плазмацентр», ООО «Мессер Эвтектик Кастолин», ООО «ОЦПН», ООО «Энергия 3000».

В рамках конференции для представителей промышленности одновременно прошли школы-семинары: «Все методы повышения стойкости инструмента, штампов холодного деформирования, прессформ и другой технологической оснастки»; «Наплавка и напыление — выбор технологии, оборудования и материалов»; «Ремонт, восстановление, упрочнение и контроль качества литейной оснастки, кузнечно-прессового инструмента и штампов»; «Конструирование деталей и узлов трения с повышенной долговечностью и износостойкостью».

В процессах обсуждения участники конференции отметили политические аспекты и сложности внедрения передовых современных технологий ремонта, восстановления и упрочнения. Активно высказывались мнения о целесообразности организации региональных центров реновации технических средств, активизации работ по применению новых наукоемких технологий для ремонта и особенно для упрочнения ответственных деталей и инструмента. Участники конференции отметили широкое применение плазменных, лазерных, ультразвуковых и других высокоэффективных электрофизических процессов для продления ресурса работы деталей, инструмента и технологической оснастки. Нанотехнологии выходят из исследовательских лабораторий и все шире применяются для упрочнения различных изделий. Активно проводятся совместные работы ученых и практиков различных стран СНГ. Международные конференции подобного формата способствуют развитию практически всех секторов экономики как России, так и других стран.

Ежегодно проводимая в Санкт-Петербурге конференция, посвященная технологиям ремонта, восстановления и упрочнения, является важным звеном для интеграции науки и производства. К открытию конференции издали сборник докладов в двух томах общим объемом примерно 1000 страниц. Распространялась также «Энциклопедия технологий ремонта, восстановления и упрочнения» — компакт-диск всех материалов предшествующих конференций (около 6000 с.) с компьютерной программой поиска по ключевым словам информации для решения научно-практических задач.

Н. Л. Иванова

4-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ЛАЗЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

26–29 мая 2009 г. в Крыму на базе Дома творчества ученых «Кацивели» состоялась 4-я Международная конференция «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов, LTWMP-2009», организованная ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, НИИ лазерной техники и технологии НТТУ «КПИ» и Международной ассоциацией «Сварка». Сопредседателями ее Программного комитета являлись академик Б. Е. Патон и проф. В. С. Коваленко.

Начиная с 2003 г. конференции по отмеченной тематике проводятся регулярно и собирают экспертов по этой прогрессивной технологии со всего мира. Официальный рабочий язык конференции — английский. В этом году несмотря на все сомнения ор-

ганизаторов относительно целесообразности проведения конференции в условиях жесткого глобального кризиса профессионалы лазерной технологии из семи стран мира (на предшествующих конференциях количество стран-участниц обычно превышало 20) успешно преодолели все проблемы своего участия в конференции.

После приветствия пленарную часть конференции открыл проф. В. С. Коваленко докладом «Современные тенденции развития высоких технологий в машиностроении». Речь в нем шла о новой парадигме развития машиностроения (Competitive Sustainable Manufacturing — конкуренто-способное производство) и необходимости внедрения в производство инноваций, которые базируются на прогрессивных технологиях и включают автоматизацию процессов сборки и разборки в промышленности, разработки высокоэффективных лазеров — диодных, оптоволоконных и др.

Фундаментальный доклад сделал проф. Г. А. Туричин с коллегами из Санкт-Петербургского технического университета — «Лазерная гибридная сварка трубной стали — моделирование и технология». Теоретическому анализу гибридных процессов также посвящен доклад проф. И. В. Кривцуна с коллегами из ИЭС им. Е. О. Патона «Взаимодействие плотной газоразрядной плазмы с металлической поверхностью, испаряющейся во время плазменной и лазерно-плазменной сварки». Др. А. Гуменюк из Федерального института исследования материалов (г. Берлин, Германия) доложил результаты исследований лазерной гибридной сварки толстостенных конструкций с использованием волоконного лазера. Китайские коллеги представили два доклада из лазерного центра Дзензянского университета технологий (г. Ханчжоу). В одном из них результаты общих исследований с коллегами из НИИ лазерной технологии НТУУ «КПИ» представлены проф. Джинхуа Яо — «Изучение остаточных напряжений и механических свойств турбинных лопаток из нержавеющей стали, модифицированных лазерным излучением». Проф. А. Н. Грезев из Института лазерных и информационных технологий РАН (Шатура) выступил с докладом «Лазерное оборудование и методы лазерной резки, сварки и поверхностной обработки», которые в последнее время разработаны в этом институте для различных предприятий.

В ряде докладов рассмотрена возможность управления локальными термическими деформациями с помощью лазерного излучения для того, чтобы изменить форму и жесткость деталей из листовых материалов — М. Грден и проф. Ф. Волерстен (Институт лучевой техники, Бремен, Германия), а молодой исследователь из НИИ лазерной техники и технологии НТУУ «КПИ» А. Кагляк с коллегами представил доклад «Формирование изделий из металлических листовых материалов с помощью лазера». Возможности применения лазерного излучения для перфорации и сверления нефтяных и газовых буровых скважин обсуждали специалисты из Украинского государственного геологического исследовательского института (Киев). Литовский коллега проф. С. Сипявичус (Институт физики АН Литвы, Вильнюс) предложил использовать лазерное излучение для изготовления наночастиц металлов.

В нескольких докладах из КПИ рассмотрены возможности изготовления стендов для кардиохирургических операций (Р. Жук, Н. Анякин и др.). Один из них представлен студенткой И. Вахдатиния (Иран), которая подготовила магистерскую работу. Среди других тем, вызвавших общий интерес, — доклад проф. Л. Ф. Головко из КПИ (изготовление алмазного режущего инструмента с помощью технологии лазерного выращивания изделий) и др.

Во время пленарных и стендовых сессий рассмотрено свыше 50 докладов. По завершению конференции организован круглый стол, где обсуждались актуальные проблемы развития лазерных технологий. Серьезная дискуссия посвящена особенностям физических явлений, наблюдаемых при взаимодействии лазерного излучения и плазмы в ходе реализации гибридной «лазер + плазма» обработки.

Во время дискуссии по применению в исследованиях различных методов моделирования подчеркнуто, что разработка физических и математических моделей процессов целесообразна в тех случаях, когда результаты моделирования имеют хорошую корреляцию с практическими (экспериментальными) результатами.

К открытию конференции издали сборник тезисов и программу конференции. К концу ноября 2009 г. будут изданы труды конференции на английском языке (труды предыдущих конференций LTWMP-03, LTWMP-05, LTWMP-07 можно заказать в редакции журнала «Автоматическая сварка»).

Доброжелательная, гостеприимная, творческая обстановка на конференции способствовала развитию полезных дискуссий, установлению деловых контактов. Участники конференции из разных стран, учитывая ее безусловный успех, выразили единодушное одобрение предложению провести следующую, 5-ю Международную конференцию по лазерным технологиям в сварке и обработке материалов (LTWMP-11) в мае 2011 г. — Кацивели, Крым, Украина.

В. С. Коваленко,
А. Т. Зельниченко

ДЕНЬ НАУКИ В ИЭС им. Е. О. ПАТОНА

В третью субботу мая в Украине отмечается профессиональный праздник работников науки — День науки. Целью его является широкое информирование общественности о практических разработках отечественных научных работников, улучшении контактов между научными учреждениями и представителями деловых кругов.

В ИЭС им. Е. О. Патона стало доброй традицией в День науки приглашать студентов-первокурсников на экскурсию по музейному комплексу института и ряду отделов. Посещая отделы, молодежь узнает о новых направлениях исследований, разрабатываемом оборудовании и непосредственно может пообщаться с сотрудниками института.

Обычно инициаторами каждой из таких экскурсий являются члены Совета научной молодежи института (СНМИ). При этом каждый раз устроители стараются учитывать пожелания экскурсантов. В этом году их ожидал приятный сюрприз: староста первого курса сварочного факультета НТУУ «КПИ» Юра Кравченко работает в институте, в отделе специализированной высоковольтной техники и лазерной сварки (отд. 77). Он-то и помог студентам сориентироваться в выборе мест для посещения, организовал группу и приехал с ней. В институте их встретили председатель СНМИ канд. техн. наук С. Г. Войнарович и один из членов совета — В. Синюк. Студенты посетили музейный комплекс ИЭС им. Е. О. Патона, где и ознакомились со славной историей института и его основателем академиком Евгением Оскаровичем Патоном.

В отделе физико-механических исследований свариваемости конструкционных сталей (отд. 18) молодых людей особенно заинтересовала технология подводной сварки. Они «вживую» увидели водолазные костюмы, бассейн, в котором проводятся эксперименты, переговорное устройство для связи с водолазом и непосредственно процесс сварки.

Кроме того, студенты познакомились с технологией и оборудованием для детонационного напыления. После этого их повели в «родной» отдел старосты. Там сотрудник этого отдела, зам. председателя СНМИ канд. техн. наук В. Ю. Хаскин ознакомил их с конструкцией твердотельных и газовых лазерных установок, продемонстрировал технологическую оснастку для проведения процессов лазерных сварки, резки и наплавки, а также гибридной лазерно-дуговой сварки. Затем студенты посетили лабораторию лазерной резки отдела № 77, где им продемонстрировали оборудование для прецизионной резки.

Посещение музейного комплекса ИЭС им. Е. О. Патона

Демонстрация оборудования для подводной сварки

Ознакомление с технологическим CO_2 лазером

Завершая экскурсию, С. Г. Войнарович пожелал будущим выпускникам НТУУ «КПИ» найти такое профессиональное призвание, которое сможет не только материально обеспечить, но и придется им по душе. Ведь одной из составляющих жизненного успеха является влюбленность человека в свою работу.

С. Г. Войнарович, В. Ю. Хаскин

К 25-ЛЕТИЮ СВАРКИ В ОТКРЫТОМ КОСМОСЕ

Рис. 1. Президиум торжественного собрания.

25 июля 2009 г. исполнилось 25 лет со дня проведения в открытом космосе летчиками-космонавтами СССР Светланой Евгеньевной Савицкой и Владимиром Александровичем Джанибековым первых в мире экспериментов по сварке, резке, пайке и нанесению покрытий. Это поистине уникальное событие навсегда войдет в историю развития космической науки и техники.

С 14 по 16 июля 2009 г. в Киеве прошли торжественные мероприятия, посвященные этой дате.

14 июля 2009 г. в Большом конференц-зале Академии наук Украины состоялось торжественное собрание, в котором приняли участие дважды Герои Советского Союза летчики-космонавты СССР Светлана Евгеньевна Савицкая и Владимир Александрович Джанибеков, а также бывший руководитель отдела РКК «Энергия», ныне Генеральный директор межотраслевого научно-технического центра «Полезные нагрузки космических объектов», внесший большой вклад в осуществление данного эксперимента, Владимир Петрович Никитский. В работе торжественного собрания участвовали сотрудники научных учреждений Академии наук, ракетно-космической отрасли и высших учебных заведений, готовящих специалистов для ракетно-космической промышленности. В работе торжественного собрания приняли также участие Президент Украины (1994 – 2005 гг.) Л. Д. Кучма, Первый космонавт независимой Украины, Герой Украины Л. К. Каденюк, министр экономики Украины Б. М. Данилишин, Генеральный конструктор — Генеральный директор КБ «Южное» С. Н. Конюхов и др. (рис.1)

Открыл торжественное собрание президент Национальной академии наук Украины академик Борис Евгеньевич Патон. Он приветствовал находящихся в зале «виновников» этого уникального эксперимента С. Е. Савицкую, В. А. Джанибекова и В. П. Никитского, а также всех участников торжественного собрания.

С докладом, посвященным 25-летию сварки в открытом космосе, выступил академик Б. Е. Патон.

Он, в частности, отметил, что успешное выполнение уникальных экспериментов по сварке, резке, пайке и нанесению покрытий в условиях космического пространства показало возможность эффективной деятельности космонавтов при выполнении сложных работ на борту пилотируемого орбитального комплекса в открытом космосе. Программы освоения космического пространства, осуществляемые в настоящее время и планируемые на будущее, предусматривают создание крупногабаритных космических объектов в космосе и на Луне. Естественно, что эксплуатация таких сооружений в течение длительного времени потребует проведения систематического профилактического обслуживания, а также ремонтно-восстановительных и монтажных работ как внутри герметичных отсеков, так и снаружи.

Одним из наиболее перспективных технологических процессов для этих целей является сварка. Космонавтам придется работать на разных участках космического аппарата и иметь дело с различными конструкционными материалами. Для этих целей в Институте электросварки им. Е. О. Патона и был создан универсальный электронно-лучевой ручной инструмент (УРИ). Проведенный эксперимент свидетельствует о высоком совершенстве сварочной аппаратуры, созданной в результате многолетней напряженной работы большого коллектива ученых и инженеров Института электросварки им. Е. О. Патона в тесном сотрудничестве с Центром подготовки космонавтов им. Ю. А. Гагарина. Космонавты С. Е. Савицкая и В. А. Джанибеков проявили подлинный героизм, взяв на себя роль первопроходцев в этих основополагающих космических экспериментах. Они буквально сломали лед недоверия у скептиков, сомневающихся в самой возможности использования в космосе сварочных технологий. Их подвиг навсегда вошел в историю развития сварочной науки и техники.

Эксперимент показал, что компактные универсальные инструменты типа УРИ позволят космонавтам выполнять работы, связанные с ремонтом или монтажом на внешней поверхности космического объекта с обеспечением необходимого качества сварных соединений. Космические корабли и станции, а также инфраструктура экспедиционных поселений на поверхности Луны, рассчитанные на длительную эксплуатацию в условиях космоса, должны быть оснащены комплектами сварочной аппаратуры, позволяющими выполнять монтажные и ремонтные работы при строительстве и эксплуатации объектов, а экипажи кораблей и экспедиций

должны быть обучены основам сварочных технологий и иметь практические навыки выполнения указанных работ.

Б. Е. Патон отметил, что сварке и родственным технологиям предстоит в дальнейшем сыграть значительную роль в освоении космоса. Электронно-лучевые технологии, опробованные в открытом космосе, могут найти применение как в различных физических экспериментах, так и в производстве уникальных полупроводниковых материалов. Это позволит перейти от опытов с электронным лучом на орбитальных станциях к созданию реальных сварных объектов, например при строительстве лунных поселений и осуществлению различных производств на Луне еще в первой половине XXI в.

Затем выступили летчики-космонавты СССР С. Е. Савицкая и В. А. Джанибеков, а также В. П. Никитский, которые поделились своими воспоминаниями об этом уникальном событии — подготовке и проведении эксперимента в открытом космосе.

Министр экономики Украины Б. М. Данилишин зачитал приветствие от Премьер-министра Украины Ю. В. Тимошенко торжественному собранию.

От Совета по космическим исследованиям НАН Украины выступил заместитель председателя, директор Главной астрономической обсерватории НАНУ, академик НАНУ Я. С. Яцкив, который отметил большое значение этого выдающегося события.

В связи с празднованием 25-летия сварки в открытом космосе Президиум Академии наук Украины наградил медалями НАНУ за «Научные достижения» С. Е. Савицкую, В. А. Джанибекова и В. П. Никитского, которые им вручил академик Б. Е. Патон.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона гостей принял директор института академик Борис Евгеньевич Патон. В ходе беседы обсуждались новые разработки Института в области сварки и родственных технологий, а также достижения по сварке в области медицины. Со специалистами

Рис. 2. После беседы с сотрудниками КПИ.

института рассмотрены вопросы ремонтно-восстановительных и монтажных работ в открытом космосе.

Космонавты С. Е. Савицкая и В. А. Джанибеков, а также В. П. Никитский посетили Киевский политехнический институт. Здесь состоялась беседа с первым проректором, академиком НАН Украины Ю. И. Якименко, проректором, чл.-кор. НАН Украины С. И. Сидоренко и др. (рис. 2). В беседе приняли участие академики НАНУ Л. М. Лобанов и Я. С. Яцкив. Гостям рассказали об истории КПИ и нынешней деятельности института.

После беседы гости посетили аудиторию, в которой учился создатель практической космонавтики, выдающийся конструктор советских космических систем Сергей Павлович Королев и ознакомились с экспонатами. С. Е. Савицкая, В. В. Джанибеков и В. П. Никитский возложили цветы к памятникам С. П. Королева, Е. О. Патона и И. И. Сикорского, а также посетили аэрокосмический музей КПИ.

Е. А. Аснис,
В. Ф. Шулым,
Н. В. Пискун,
И. И. Статкевич

ANTARES
INTERNATIONAL COMPANY

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОМПАНИЯ «АНТАРЕС»

BUREAU VERITAS Certification

Certification

International Company "Antares" Ltd.

Bureau Veritas certify that the Management System of the above organisation has been audited and found to be in accordance with the requirements of the management system standards detailed below

STANDARD

ISO 9001:2000

SCOPE OF SUPPLY

PRODUCTION AND SELLING TITANIUM AND ZIRCONIUM INGOTS, HEAT-RESISTANT METALS AND SPECIAL ALLOYS

27 December, 2008

26 December, 2011

27 December, 2005

UA225924

Международная компания «Антарес» основана в 1994 г. в Киеве (Украина).

Последние 10 лет деятельность компании неразрывно связана с развитием высоких технологий в области электронно-лучевой металлургии. Они включают проектирование и изготовление специализированного оборудования, создание экологически чистых энергосберегающих технологий.

Нашей компанией разработаны и применяются новейшие технологии электронно-лучевого переплава в вакууме титана, циркония, жаропрочных и специальных сплавов на их основе. Компания достигла определенных результатов благодаря слаженной и творческой работе высококвалифицированных инженеров и специалистов. Их знания и большой опыт работы являются основой для решения сложнейших задач по созданию оборудования и эксплуатации его в процессе производства.

На основе научного потенциала и возможностей компании мы можем предложить потребителям следующее:

разработку и изготовление «под ключ» вакуумных электронно-лучевых печей для переплава различных металлов и сплавов, установок для электронно-лучевой сварки, напыления и других процессов в вакууме;

производство слитков из титана, циркония, жаропрочных металлов и специальных сплавов — круглых диаметром от 370 до 1100 мм и длиной до 4 м; плоских (слябов) шириной от 1100 до 1350 мм, толщиной 180… 425 мм и длиной до 4 м;

широкий спектр услуг по определению химического состава металлов и сплавов, наличия в них углерода и серы, а также содержания газов (азота, кислорода, водорода) с использованием приборов и установок ведущих мировых фирм.

Техническая характеристика производства

Основу производства компании составляют две вакуумные электронно-лучевые печи ВТ01 установленной мощностью по 2,5 МВт и производительностью 2,5 тыс. т титана в год каждая. В настоящее время заканчивается изготовление и монтаж печи нового поколения ВТ02 с установленной мощностью 3,2 МВт и с использованием высоковольтных инверторных источников питания годовой производительностью до 3 тыс. т. Конструкция печи позволит получать круглые слитки и слябы титана и его сплавов массой до 14 т, длиной до 5,5 м.

Технология переплава в указанных электронно-лучевых печах позволяет следующее:

реализовать холодноподовый плавильный процесс с максимальным эффектом рафинирования;

осуществлять экономичный процесс плавки при встречной горизонтальной подаче с одновременным плавлением расходуемых заготовок;

переплавлять некомпактную (губчатый титан, лом), брикетированную или прутковую шихту при минимальных затратах на ее предварительную подготовку;

обеспечить высокую производительность процесса плавления химически активных и тугоплавких металлов за счет применения электронно-лучевых пушек высоковольтного тлеющего разряда, стабильно работающих при значениях давления 1,33… 0,133 Па;

осуществлять получение одновременно двух и более слитков;

управлять процессом кристаллизации для обеспечения заданной структуры слитков.

Разработанные компанией электронно-лучевые печи по ряду показателей превосходят зарубежные аналоги. Их конструктивные особенности и применяемая технология обеспечивают получение высококачественного титана при низкой себестоимости. Этому также способствует применение ресурсосберегающих технологий (минимальное количество отходов, применение губчатого титана низких сортов без подготовительных операций). Использование новых научных и технических решений при создании электронно-лучевых печей и технологий позволяет снизить стоимость титана по сравнению с вакуумно-дуговым способом его получения.

НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ!

К 80-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ И 55-ЛЕТИЮ НАУЧНОЙ И ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МИХАИЛА ИВАНОВИЧА ГАСИКА

30 июня 2009 г. исполнилось 80 лет со дня рождения Михаила Ивановича Гасика, академика НАН Украины, заместителя председателя Приднепровского научного центра НАН Украины, иностранного члена Российской академии наук, почетного члена Национальной академии наук Республики Казахстан, иностранного члена АН Грузии, заслуженного деятеля науки и техники Украины, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой электрометаллургии Национальной металлургической академии Украины (НМетАУ).

М. И. Гасик закончил Днепропетровский металлургический институт (ныне НМетАУ) в 1954 г. С тех пор вся его научная и педагогическая деятельность неразрывно связана с этим высшим учебным заведением.

Этапы его научной и педагогической деятельности такие же, как и у большинства выпускников вузов, посвятивших себя научным исследованиям и подготовке инженерных и научных кадров высшей квалификации. Он последовательно проходил путь работы в качестве младшего научного сотрудника, учебы в аспирантуре, защиты кандидатской и докторской диссертаций, должностей доцента и профессора.

В 1973 г. М. И. Гасик возглавил кафедру электрометаллургии ДМетИ, сменив на этом посту своего учителя, видного ученого-электрометаллурга, доктора технических наук, заслуженного деятеля науки и техники Украины профессора Спиридона Иосифовича Хитрика. При активном и непосредственном участии М. И. Гасика в 1976 г. в ДМетИ организован электрометаллургический факультет, деканом которого он был на протяжении 12 лет.

Начало научной деятельности Михаила Ивановича связано с проведением исследований на кафедре электрометаллургии и запорожских заводах «Днепроспецсталь», Ферросплавном, Алюминиевом и Абразивном комбинатах, а также других предприятиях региона. В 1957–1960 гг. им разработаны теоретические основы и технологические режимы принципиально нового процесса производства особо низкоуглеродистого и низкоазотистого феррохрома вакуумтермическим способом и на его основе выплавка в дуговых печах особо низкоуглеродистых коррозионно-стойких хромоникелевых сталей с бором специального назначения.

Многоплановые теоретические и экспериментальные исследования и опытно-промышленное освоение вакуумтермического феррохрома, коррозионно-стойких сталей для трубной промышленности обобщены в кандидатской (1961 г.) и докторской (1969 г.) диссертациях.

М. И. Гасиком самостоятельно и в соавторстве выполнен ряд эффективных разработок, по своему значению имевших общеотраслевое значение. Результаты работ обобщены в монографиях «Электроды рудовосстановительных печей» (1976, 1988 гг.), «Электротермия неорганических материалов» (1990 г.), которые в комплексе с другими разработками коллектива соавторов отмечены Премией Совета Министров СССР.

При активном участии М. И. Гасика на Днепровском алюминиевом заводе (г. Запорожье) в начале 1960-х гг. разработана и освоена эффективная сквозная технология промышленного производства электротермического силумина в дуговых печах на основе вовлечения в выплавку первичного кремниево-алюминиевого сплава дистенсилиманитового концентрата Верхнеднепровского горно-металлургического комбината, за которую ему в соавторстве с группой ученых и работников цветной металлургии в 1977 г. присуждена Государственная премия УССР.

М. И. Гасик руководил научными разработками по совершенствованию технологии производства высокомарганцевой стали Гадфильда для отливок крестовин и сердечников стрелочных переводов магистрального железнодорожного транспорта, результаты которых обобщены в монографии «Металлургия высокомарганцевой стали» (1990 г). Под его научным руководством выполнены прецизионные исследования качества ферросплавов, изложенные в коллективной монографии «Структура и качество промышленных ферросплавов и лигатур» (1975 г.).

В 1988 г. за разработку инновационных технологий производства марганцевых ферросплавов в условиях Никопольского горноэлектрометаллургического комплекса в соавторстве с Героем социалистического труда директором НЗФ Б. Ф. Величко М. И. Гасику и другим ученым-соисполнителям присуждена Государственная премия Украины.

В течение многих лет под научным руководством М. И. Гасика кафедрой электрометаллургии в содружестве со специалистами Нижнеднепровского трубопрокатного завода проводились работы по совершенствованию технологии выплавки и внепечной обработки колесной стали для подвижного сос-

тава ИПС, результаты которых получили широкое внедрение в производство, а авторский коллектив во главе с М. И. Гасиком в 2004 г. удостоен Государственной премии Украины.

В настоящее время М. И. Гасик является научным руководителем работ по выполнению контракта с индийской фирмой «Jindal Stainlees», заключенного ОАО ВТФ «Термоэкспорт», ОАО «Сибэлектротерм», НМетАУ и НПФ «Техносплавы», о сооружении крупного промышленного цеха и научном сопровождении технологии выплавки марганцевых ферросплавов.

В 1982 г. М. И. Гасик избран членом-корреспондентом, а в 1990 г. — академиком Национальной академии наук Украины. В 1983 г. вышло первое издание учебника «Электрометаллургия ферросплавов» в соавторстве с доктором технических наук, профессором Б. И. Емлиным. В 1988 г. с грифом Минвуза СССР издан учебник «Теория и технология производства ферросплавов». Учебник получил высокую оценку коллективов вузов. Научно-техническая общественность высоко оценила изданную в Москве и США Н. П. Лякишевым и М. И. Гасиком монографию «Металлургия хрома» («Metallurgy of chromium»), отмеченную премией им. Ярослава Мудрого Академии наук высшей школы Украины.

М. И. Гасик является членом редколлегии и соавтором фундаментального двухтомного издания «Энциклопедического металлургического словаря».

В 1997 г. за фундаментальную научную монографию «Марганец» М. И. Гасик удостоен премии им. Е. О. Патона. Высокую оценку получила монография «Электрометаллургия ферросилиция», изданная в 2005 г. и отмеченная премией НАН Украины им. З. И. Некрасова.

В 2005 г. М. И. Гасик и Н. П. Лякишев переиздали учебник «Физико-химия и технология электроферросплавов» с грифом Министерства образования и науки Российской Федерации и Украины. В 2004 г. вышел учебник «Проектирование и оборудование электросталеплавильных и ферросплавных цехов». Авторский коллектив учебника в составе докторов технических наук, профессоров В. А. Гладких, М. И. Гасика. А. Н. Овчарука и Ю. С. Пройдака удостоен премии АН Высшей школы Украины им. Ярослава Мудрого. Библиотеки вузов пополнились также содержательным учебником «Ферросплавные эпектропечи» этого же коллектива авторов.

Самостоятельно и в соавторстве М. И. Гасиком опубликовано более 600 научных работ, в т. ч. 21 монография, 8 учебников, 11 учебных пособий, защищено более 250 авторских свидетельств, а также десятки патентов Украины, России США и других государств.

М. И. Гасик являлся членом экспертного совета по металлургии ВАК СССР, членом секции металлургии Госкомитета по Ленинским и Государственным премиям, председателем научно-методической комиссии по направлению «Металлургия» Минвуза СССР, членом проблемной комиссии «Черная металлургия СССР» при Президиуме АН СССР и ГКНТ СССР, в 1999 г. — членом секции Комитета по Государственным премиям Украины в области науки и техники. В 1992 г. М. И. Гасик назначен заместителем председателя научно-методической комиссии по направлению «Металлургия» Министерства образования и науки Украины.

Учитывая большой вклад академика НАН Украины М. И. Гасика в выполнение научных разработок совместно с научными коллективами стран СНГ, а также его активное участие в подготовке кадров высшей научной квалификации, он избран иностранным членом РАН, почетным членом НАН Республики Казахстан и иностранным членом АН Грузии. За большой вклад в развитие теории и технологии металлургического производства, совершенствование учебного процесса, подготовку студентов и специалистов высшей квалификации М. И. Гасик в 1999 г. награжден государственным орденом Украины «За заслуги III степени». В 1999 г. ему присвоено звание «Заслуженный деятель науки и техники Украины».

М. И. Гасик активно участвует в работе научно-технического совета по производству ферросплавов международного Союза металлургов. Он — член редколлегий ряда журналов («Сталь», «Современная электрометаллургия», «Электрометаллургия» «Металлургическая и горнорудная промышленность», «Теория и практика металлургии»), а также редактор ряда научных сборников.

М. И. Гасик является крупным ученым, внесшим весомый вклад в развитие мировой науки в области электрометаллургии стали, ферросплавов и электротермических неорганических материалов, генератором научных идей и организатором научно-педагогической деятельности школы электрометаллургов. Он пропагандирует научные знания путем проведения постоянных научно-технических конференций, развивая и приумножая славные достижения известной украинской школы электрометаллургов.

Научная общественность, друзья и товарищи по работе сердечно поздравляют Михаила Ивановича с юбилеем, желают ему доброго здоровья, творческого долголетия, счастья и семейного благополучия.

Первый проректор Национальной металлургической академии Украины, доктор технических наук, профессор В. П. Иващенко

Коллектив Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, редколлегия и редакция журнала «Современная электрометаллургия» от всей души поздравляя Михаила Ивановича со славным юбилеем, желают ему крепкого здоровья, долголетия и дальнейших творческих успехов!

А. К. ЦЫКУЛЕНКО — 70

2 июля 2009 г. исполнилось 70 лет со дня рождения ведущего научного сотрудника Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, доктора технических наук Анатолия Константиновича Цыкуленко — известного ученого в области специальной электрометаллургии. Редколлегия журнала поздравляет юбиляра, являющегося не только давним его автором, но и бессменным рецензентом.

После окончания Киевского политехнического института А. К. Цыкуленко пришел по распределению в Институт электросварки в 1961 г. и поначалу занимался сваркой разнородных сталей. Уже на этом этапе освоения профессии инженера-исследователя А. К. Цыкуленко проявил присущие ему смелость в сочетании с методичностью, целеустремленностью и изобретательностью на пути к решению научно-технических задач различной природы и степени сложности.

С 1966 г. Анатолий Константинович связал свою работу с только зарождавшейся специальной электрометаллургией и прежде всего с различными техническими и технологическими применениями электрошлакового процесса. С тех пор шаг за шагом он методично двигался не только к углублению понимания сущности физических и химических явлений, сопровождающих протекание электрошлакового процесса, но и к созданию новых технологий на его базе.

Все эти годы А. К. Цыкуленко трудился не только в лабораториях родного института, но и на многих металлургических и машиностроительных заводах страны: Краматорска, Мариуполя, Запорожья, Ижоры и др.

На всех этапах жизненного пути юбиляра коллеги всегда отмечали его порядочность, уверенность в своих силах в сочетании со скромностью и глубокими знаниями, иными словами, подлинную интеллигентность.

Возможно, в силу именно такого сочетания личностных качеств А. К. Цыкуленко, некоторые его работы, выполненные 30 и более лет назад, сегодня опять выходят на передний край. К их числу относится и технология электрошлаковой подпитки с кусковыми присадочными материалами, реализованная в свое время при литье танковых башен и ставшая стержнем его докторской диссертации.

Семидесятилетие не всегда становится отправным пунктом для нового этапа исследований, дальнейшего поиска. Анатолий Константинович относится как раз к числу приятных исключений.

В последние годы он занялся изысканиями новых способов подавления сегрегации в крупных кузнечных слитках для энергетического машиностроения. В этой области, где он проработал практически на протяжении всей карьеры исследователя, им предложены в последнее время интереснейшие подходы сочетания классического электрошлакового переплава твердых расходуемых электродов с прямой подачей жидкого металла.

А. К. Цыкуленко — автор более 300 научных трудов, в том числе семи монографий и более 100 изобретений. Он примерный семьянин, верный и надежный друг, настоящий патоновец, достойный представитель школы своего учителя — академика Б. И. Медовара.

От всего сердца желаем Анатолию Константиновичу счастья, здоровья и радости решения новых задач.

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

К 70-летию Г. М. ГРИГОРЕНКО

В августе исполнилось 70 лет Георгию Михайловичу Григоренко — известному ученому в области специальной электрометаллургии и материаловедения, академику НАН Украины, доктору технических наук, профессору, лауреату Государственной премии Украины в области науки и техники.

Родился Григорий Михайлович 24 августа 1939 г. в Киеве. Вся его трудовая и научная деятельность связана с Институтом электросварки им. Е. О. Патона, куда он пришел молодым специалистом в 1961 г. после окончания Киевского политехнического института. Выполненные им в Институте электросварки работы свидетельствуют о высоком профессионализме ученого и организатора.

Глубокие и обстоятельные исследования ученого в области специальной электрометаллургии снискали ему заслуженное признание и высокий научный авторитет. Г. М. Григоренко известен широкому кругу научной общественности в Украине, ближнем и дальнем зарубежье как выдающийся специалист в области изучения взаимодействия газов с жидкими металлами в обычном колебательном состоянии и в случае дугового и плазменного плавления. В частности, его исследования растворимости азота и водорода в чистых металлах и сплавах с особыми свойствами при высоких значениях температуры и давления внесли серьезный вклад в теорию металлургических процессов.

Г. М. Григоренко рассчитаны термодинамические константы равновесия систем металл–азот и металл–водород. Установлены температурные зависимости растворения и параметры взаимодействия этих газов с жидкими металлами. Определены особенности поглощения азота из плазмы электрической дуги и коэффициенты пропорциональности для квазиравновесных условий поглощения азота различными металлическими расплавами. Результаты исследований представлены в виде уравнений и математических моделей, позволяющих рассчитать ожидаемое содержание азота в расплавах и слитках.

Последние годы Г. М. Григоренко активно занимается исследованиями физико-химических свойств флюсов и шлаков (вязкость, азотопроницаемость, растворимость), используемых при сварке и специальной электрометаллургии, а также разработкой и внедрением дугошлакового переплава в азотсодержащей атмосфере для выплавки слитков высокоазотистых сталей и сплавов. Эта технология прошла широкое промышленное опробование в Украине и во Франции.

С 1984 г. Г. М. Григоренко заведует отделом физико-химических методов исследования материалов. Под его руководством работает более 70 сотрудников, из которых пять докторов и 17 кандидатов наук. Отдел занимается исследованиями качества сварных швов, газотермических покрытий, диффузионных соединений, слитков и полуфабрикатов из металлов, полученных способами специальной электрометаллургии, созданием композиционных материалов, нанесением газотермических покрытий, участвует в работах по созданию направлений электрошлаковой, плазменно-дуговой и индукционной плавки.

Георгий Михайлович большое внимание уделяет подготовке научных кадров. Под его руководством подготовлено шесть докторов и девять кандидатов технических наук. Он уже более двадцати лет является заместителем заведующего базовой кафедрой «Физическая металлургия и материаловедение» Московского физико-технического института. На этой кафедре в г. Киеве подготовлено более 100 инженеров-физиков, из которых 15 защитили кандидатские, а два — докторские диссертации.

Г. М. Григоренко с 1993 г. является заместителем главного редактора международного журнала «Современная электрометаллургия«. Он автор более 500 научных работ, в числе которых пять монографий и более 100 авторских свидетельств и патентов.

Неиссякаемая энергия ученого, целеустремленность помогают ему в поисках новых задач, стоящих перед материаловедами, металлургами и сварщиками.

Сердечно поздравляя юбиляра, желаем ему крепкого здоровья, творческих успехов в научной и педагогической деятельности, большого человеческого счастья.

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

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ ДЛЯ ЖУРНАЛА

«Современная электрометаллургия»

В журнале публикуются оригинальные (ранее не опубликованные в других изданиях) материалы.

Рукопись следует представлять в двух экземплярах. Объем обзорной или проблемной статьи не должен превышать 20 с. (включая табличный материал, список использованной литературы и перечень иллюстраций); оригинальной, связанной с решением научно-технической или производственной задачи — 10 с.; краткой информации — 4 с. машинописного (12-й кегль) текста, напечатанного через два интервала (1 с. машинописного текста соответствует 2 килобайтам). При этом количество иллюстраций в основном не должно превышать 5–6. Статья должна быть подписана авторами. Список литературы, подрисуночные подписи печатают на отдельных страницах. Статья должна содержать ключевые слова (8–10 слов).

*Публикацию статьи ускорит представление ее в электронном виде по E-mail или на дискете/CD в формате Word для Windows или в стандартном ASCII файле. Иллюстрации предоставляются в отдельных файлах в формате *.tiff (grayscale, 300 dpi) для растровой графики или *.cdr (версии не выше 11.0, 600 dpi) для векторной.*

Рукопись следует начинать с УДК в верхнем левом углу страницы, названия статьи, инициалов и фамилий авторов. Затем дают краткий (до 6–8 строк) реферат на русском языке и ключевые слова.

Иллюстрации представляют в двух экземплярах на отдельных листах. Они должны быть четкими и максимально упрощенными (рабочие чертежи не принимаются). На оборотной стороне рисунка указывают порядковый номер и фамилию первого автора. Отпечатки микро- и макроструктур не должны быть шире колонки (80 мм) на странице журнала. Надписи чернилами и пастами на микроструктурах не допускаются.

Формулы в первом экземпляре следует размечать карандашом в соответствии с общими правилами: прописные и строчные буквы сходного изображения подчеркивают двумя черточками соответственно снизу или сверху, верхние и нижние индексы отмечают полукольцами под или над индексами, греческие буквы обводят красным карандашом. Следует избегать различных символов над буквами. Порядковые номера формул, на которые имеются ссылки в тексте, ставятся справа от формулы в круглых скобках.

Таблицы размещают на отдельных страницах и нумеруют.

Цитируемая в статье литература должна быть оформлена следующим образом:

- *для книг — фамилия, инициалы автора(ов), полное название книги, город, издательство, год издания, общее количество страниц;*
- *для журнальных статей — фамилия, инициалы автора(ов), название статьи, журнал, год издания, номер, том, номер выпуска, страницы, на которых помещена статья;*
- *иностранные издания приводятся на языке оригинала.*

Все упомянутые в статье величины, обозначения элементов схем и чертежей должны соответствовать стандартам.

Размерности величин должны быть приведены в системе СИ.

При пересылке материалов просим сообщать следующие данные: фамилия, имя и отчество автора(ов), домашний и служебный адреса, телефоны, место работы, должность, ученая степень.