Международный научно-теоретический и производственный журнал

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ

№ 2 (95) 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 Гамималь (Германия)

Адрес редакции:

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

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

Свидетельство
о государственной регистрации
КВ 6185 от 31.05.2002

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Зайцев В. А., Медовар Л. Б. Подовые электроды дуговых печей постоянного тока 3

Рябинин В. А., Гришко Ю. С., Саенко В. Я., Зайцев В. А., Журавель В. М., Ярош В. М. Извлечение меди из шлаков медеплавильного производства при использовании процессов ДШП и ЭШП 9

Полещук М. А., Пузрин Л. Г., Шевцов В. Л., Бородин А. И. Электрошлаковое литье заготовок корпусов фланцевых задвижек с приплавлением патрубков 13

Скрипник С. В. Об альтернативном способе производства крупногабаритных полых заготовок в газовом турбиностроении 18

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В. Перспективы использования титана в атомной энергетике Украины 23

Олиховская Л. А., Мельниченко Т. В., Матвиенко Я. И., Устинов А. И. Фазовые превращения при нагреве многослойной фольги Al/Cu, полученной способом электронно-лучевого осаждения 27

ПЛАЗМЕННО-ДУГОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Константинов В. С., Шаповалов В. А., Давыдов С. И., Шварцман Л. Я., Теслевич С. М. Особенности технологии производства листового проката из отходов губчатого титана и изделий из него 32

ВАКУУМНО-ИНДУКЦИОННАЯ ПЛАВКА

Шаповалов В. А., Шейко И. В., Никитенко Ю. А. Некоторые особенности создания устройств для диспергирования металлического расплава 35

ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ПЕРЕПЛАВ

Константинов В. С., Шаповалов В. А., Теслевич С. М., Давыдов С. И., Шварцман Л. Я. Получение расходуемых электродов из губчатого титана для переплава в гарнисажных литейных печах 39

Демчишин А. В., Голтвяница В. С., Голтвяница С. К., Кулак Л. Д., Токарев О. А., Автономов Г. А. Структура и свойства покрытий из Ti, Ti36Al, Ti/Al, полученных способом вакуумно-дугового испарения 42

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТАЛЛУРГИИ

Лакомский В. В., Григоренко Г. М. Подход к оценке основности шлакового расплава в системе газ–шлак–металл 48

ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Найдек В. Л., Костяков В. Н., Волошин А. А. Плазменные приставки для интенсификации металлургических процессов в индукционных печах 50

ИНФОРМАЦИЯ

Ахонин С. В. Международная конференция «Ti-2009 в СНГ» 53

Григоренко С. Г. V Всеукраинская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии» 54

Б. В. Данильченко — 70 лет! 56

И. С. Малашенко — 70 лет! 57

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ

ГП «Научно-производственный центр «ТИТАН»
КП «Запоржский 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)

№ 2 (95)
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,
I. S. Batasheva

State Registration Certificate
KV 6185 of 31.05.2002

All rights reserved.
This publication and each of the articles contained here in are protected by copyright

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

CONTENTS

ELECTROSLAG TECHNOLOGY

Zaitsev V. A., Medovar L. B. Hearth electrodes of DC arc furnaces 3

Ryabinin V. A., Grishko Yu. S.,Saenko V. Ya., Zhuravel V. M., Yarosh V. M. Extraction of copper from slags of copper melting production using processes of ASR and ESR 9

Poleshchuk M. A., Puzrin L. G., Shevtsov V. L., Borodin A. I. Electroslag casting of billets of bodies of flange stop valves with melting-on of branch pipes 13

Skripnik S. V. About alternative method of production of large-sized hollow billets in gas turbine manufacturing 18

ELECTRON BEAM PROCESSES

Paton B. E., Trigub N. P., Akhonin S. V. Prospects of titanium application in nuclear power engineering of Ukraine 23

Olikhovskaya L. O., Melnichenko T. V., Matvienko Ya. I., Ustinov A. I. Phase transformations in heating multi-layer foil Al/Cu produced by the method of electron beam deposition 27

PLASMA-ARC TECHNOLOGY

Konstantinov V. S., Shapovalov V. A., Davydov S. I., Shvartsman L. Ya., Teslevich S. M. Peculiarities of technology of production of sheet rolled metal from wastes of titanium sponge and its products 32

VACUUM-INDUCTION MELTING

Shapovalov V. A., Sheiko I. V., Nikitenko Yu. A. Some peculiarities in design of devices for metal melt dispersion 35

VACUUM-ARC REMELTING

Konstantinov V. S., Shapovalov V. A., Teslevich S. M., Davydov S. I., Svartsman L. Ya. Producing of consumable electrodes of spongy titanium for remelting in skull foundry furnaces 39

Demchishin A. V., Goltvyanitsa V. S., Goltvyanitsa S. K., Kulak L. D., Tokarev O. A., Avtonomov G. A. Structure and properties of coatings of Ti, Ti36Al, Ti/Al, produced by the method of vacuum arc evaporation 42

GENERAL PROBLEMS OF METALLURGY

Lakomsky V. V., Grigorenko G. M. Approach to evaluation of basicity of slag melt in the gas-slag-metal system 48

ENERGY AND RESOURCES SAVING

Naidek V. L., Kostyakov V. N., Voloshin A. A. Plasma attachments for intensification of metallurgical processes in induction furnaces 50

INFORMATION

Akhonin S. V. International Conference «Ti-2009 in CIS» 53

Grigorenko S. G. All-Ukrainian scientific-technical conference of young scientists and specialists «Welding and related technologies» 54

B. V. Danilchenko is 70 56

I. S. Malashenko is 70 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

УДК 669.117.56

ПОДОВЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В. А. Зайцев, Л. Б. Медовар

Приведены основные виды подовых электродов-анодов дуговых печей постоянного тока, применяемых в настоящее время, их конструкции и эксплуатационные характеристики. Описан способ электрошлакового переплава со сменой стального и медного расходуемых электродов, рассмотрено качество биметаллического сталемедного слитка — заготовки анода.

Main types of hearth electrodes-anodes of DC arc furnaces, used at present, their design and service characteristics are given. Method of electroslag remelting with a change of steel and copper consumable electrodes is described and quality of bimetal steel-copper ingot-anode billet is considered.

Ключевые слова: *дуговая электропечь постоянного тока; подовый электрод-анод; биметалл; электрошлаковый переплав*

Несмотря на очередной спад в мировой экономике совершенствование предприятий черной металлургии продолжается [1]. Появление новых агрегатов и технологий характерно практически для всех переделов. Одним из заметных явлений последних лет стало широкое применение с одновременным увеличением единичной мощности дуговых печей постоянного тока (ДППТ) [2]. Основными производителями ДППТ вместимостью до 200 т являются такие предприятия, как «Danieli» (Италия), «VAI Fuchs GmbH» (Германия), «ЭКТА» (Москва, Россия), «МТФ» (Набережные Челны, Россия), «УкрНИИЭлектротерм» и «Струмтех ЛТД» (Запорожье, Украина). Сообщается о строительстве фирмой «Danieli» на заводе «Tokyo Steel» (Япония) самой мощной в мире 420-тонной дуговой печи постоянного тока, рассчитанной на ежегодный выпуск 2,6 млн т стали [3].

Дуговые электропечи постоянного тока имеют ряд преимуществ, по сравнению с традиционными ДСП переменного тока. Применение ДППТ позволяет сократить расход электродов в 2…5 раз (в зависимости от подготовки шихты); электроэнергии на 10…15 %; огнеупорных материалов на 20…30 %; исходного сырья на 1,5…2,0 %; дорогостоящих легирующих добавок на 20…60 %. Кроме того, снижается уровень шума (примерно от 105 до 85 дБ) и уменьшается количество пылегазовыбросов в 8…10 раз (от 52,5 до 6,3 кг/ч, при сравнении с 25-тонной дуговой печью переменного тока и ДППТ [2]).

В результате резкого (в 2…5 раз) снижения фликкер-эффекта повышается ресурс печных трансформаторов, гибких кабелей, короткой сети и электрододержателей. Дуговые электропечи постоянного тока характеризуются более высоким энергетическим КПД, низким процентом угара металла и (что не менее важно) лучшими условиями труда. ДППТ могут работать с полным и частичным сливом металла, а также в качестве миксера. Вследствие возможности использовать электрохимические реакции на постоянном токе для удаления вредных примесей, улучшения перемешивания металла и более высокой стабильности процесса в этих агрегатах повышается качество выплавляемого металла [4].

Отличительными особенностями конструкции дуговой печи постоянного тока являются центрально расположенный электрод (катод) и подовый электрод-анод (один или несколько), вмонтированный в днище кожуха. Кроме всего прочего, ДППТ отличаются конструктивным исполнением подового электрода [5].

Подовый электрод, размещаемый в подине печи, является одним из основных ее элементов. Он служит для подвода тока к шихте и переплавляемому металлу. Конструкция подового электрода должна обеспечивать надежность электрического контакта с шихтой при минимальных тепловых потерях, эффективность охлаждения электрода, простоту и технологичность его изготовления. Материал электро-

© В. А. ЗАЙЦЕВ, Л. Б. МЕДОВАР, 2009

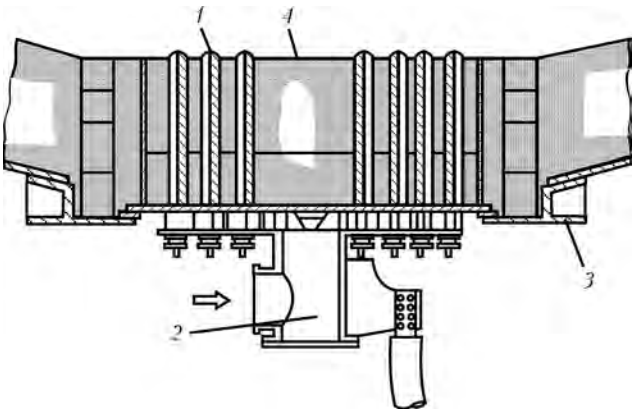


Рис. 1. Типичная схема подового электрода многоштыревого типа: *1* — контактные штыри; *2* — узел воздушного охлаждения; *3* — днище печи; *4* — огнеупорная футеровка

да необходимо выбирать с учетом надежной работы при высоких тепловых и токовых нагрузках, стойкости к механическим и тепловым ударам, чистоты расплава и отсутствия его взаимодействия с футеровкой подины. Электрод должен обеспечивать бесперебойную работу подины [6, 7], поскольку выход его из строя приводит к длительным простоям из-за необходимости замены подины и самого подового электрода.

Основными причинами, вызывающими разрушение подового электрода, являются следующие:

размывание футеровки вокруг него;

перегрев расплава;

джоулево тепло от тока, протекающего по электроду и расплаву;

физико-химическое взаимодействие расплава с материалом электрода;

микродуги между шихтой и рабочим торцом электрода;

наличие в ванне интенсивных потоков расплавленного металла, вызываемых действием электромагнитных сил и т. д.

Таким образом, указанные обстоятельства определяют основное требование к конструкции подовых электродов — высокую стойкость при хорошем электрическом контакте.

В промышленных дуговых электропечах постоянного тока применяют подовые электроды трех основных конструктивных типов: многоштыревого, пластинчатого (токоподводящая подина печи) и

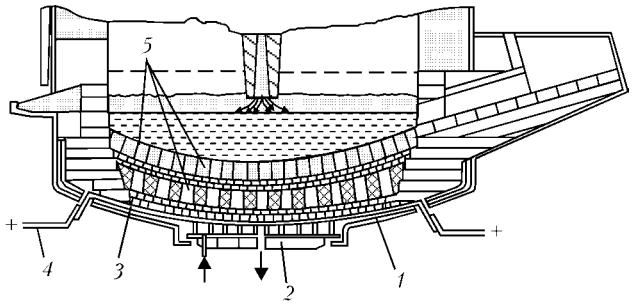


Рис. 2. Типичная схема подового электрода пластинчатого типа: *1* — днище печи; *2* — система охлаждения подового электрода; *3* — вкладыш из меди; *4* — токоподвод; *5* — подовый электрод пластинчатого типа

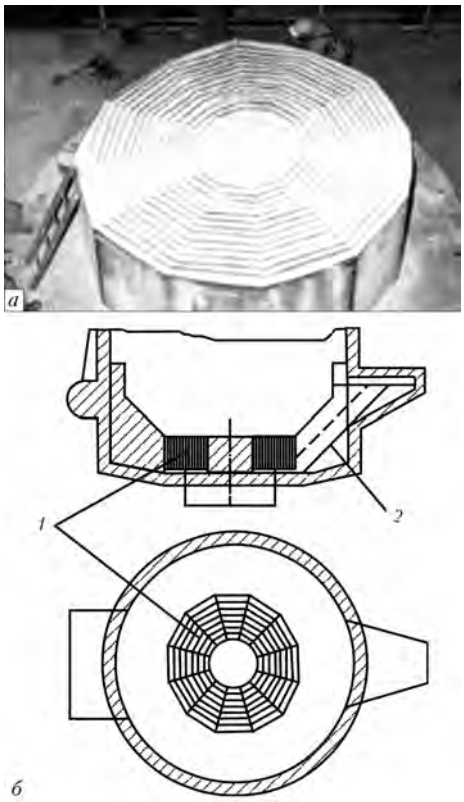


Рис. 3. Подовый электрод конструкции фирмы «VAI Fuchs»: *а* — внешний вид; *б* — схема; *1* — многоштыревой электрод; *2* — футеровка печи

стержневого [7]. Электроды многоштыревого (рис. 1) и пластинчатого (рис. 2) типов являются слабым местом конструкции ДППТ, так как по различным причинам их стойкость, согласно данным работ [8, 9], составляет всего 300...700 плавок, и из-за этого все они получили незначительное распространение, за исключением подового электрода многоштыревого типа фирмы VAI-Fuchs (рис. 3).

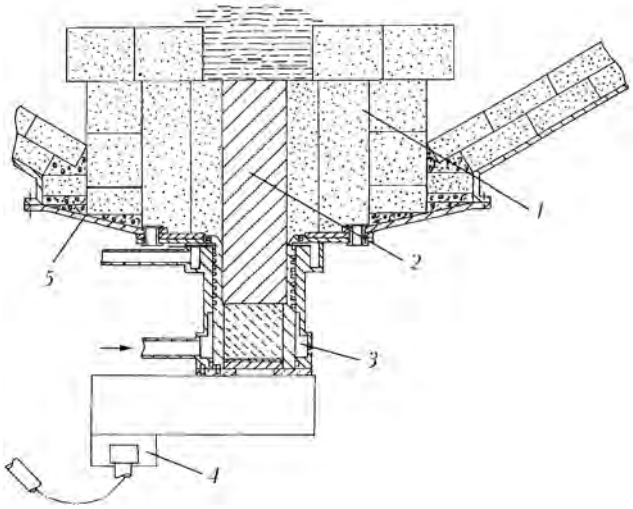


Рис. 4. Типичная схема подового электрода стержневого типа: *1* — огнеупорная футеровка печи; *2* — подовый электрод; *3* — узел водяного охлаждения; *4* — токоподвод; *5* — днище печи

Этот электрод представляет собой тонкие стальные пластины, внутри утрамбованные магнезитовой массой. Они вертикально приварены к горизонтальной плите кольцеобразной формы, установленной на поду печи. Благоприятное соотношение толщины и поверхности листов исключает необходимость в водоохлаждении, что позволяет повысить работоспособность и безопасность. Конструкция электрода способствует плавной и равномерной передаче электрического тока через расплав к пластинам и далее к стальным листам, а также элементам короткой сети. Электроды этого типа работают без ремонта до 2000 ч.

Наибольшее применение в агрегатах ДППТ на территории СНГ и за его пределами получили подовые электроды стержневого типа (рис. 4). Особенно распространены аноды, выполненные составными в виде медного водоохлаждаемого стержня, к которому со стороны переплавляемого металла прикреплена способом сварки или другими стальная головка, контактирующая с расплавленным металлом.

Из зарубежных производителей таких электродов (как и самих агрегатов ДППТ) следует выделить итальянскую фирму «Danieli», в 1996 г. разработавшую и оснастившую свои агрегаты ДППТ подовым электродом стержневого типа (рис. 5).

Подовый электрод состоит из следующих частей: стальной *1* и охлаждаемой *2*, соединяющей стальную и медную; нижней трубчатой медной *3* и футерованной огнеупорным материалом *4*. Последняя расположена в нижней части головки медного электрода и имеет спиралевидные каналы для воды. Внешняя поверхность покрыта керамическим материалом для предупреждения прорыва металла в электрод. Стальная и медная части соединены способом алюмотермической сварки. В процессе работы стальная часть электрода частично расплавляется под действием теплоты жидкого металла и джоулевого тепла, выделяемых при прохождении тока.

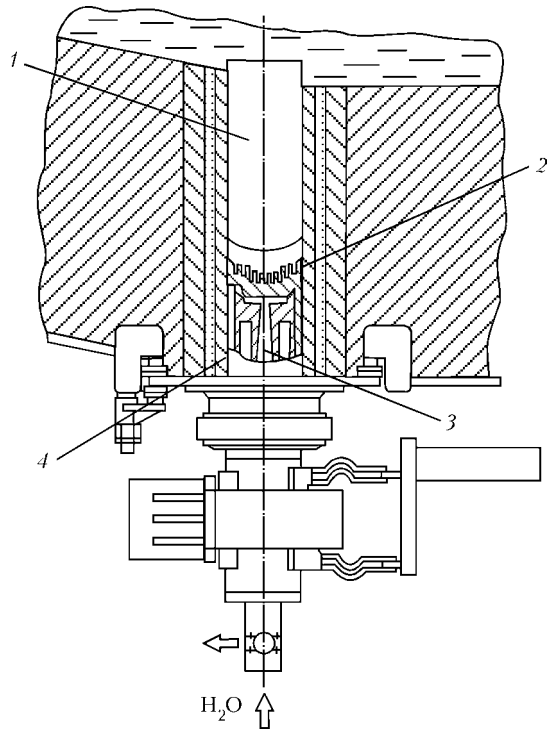


Рис. 5. Подовый электрод дуговой сталеплавильной печи постоянного тока конструкции фирмы «Danieli» [10]; обозн. см. в тексте

Электроды фирмы «Danieli» успешно эксплуатируют в одно- и двухэлектродных дуговых печах

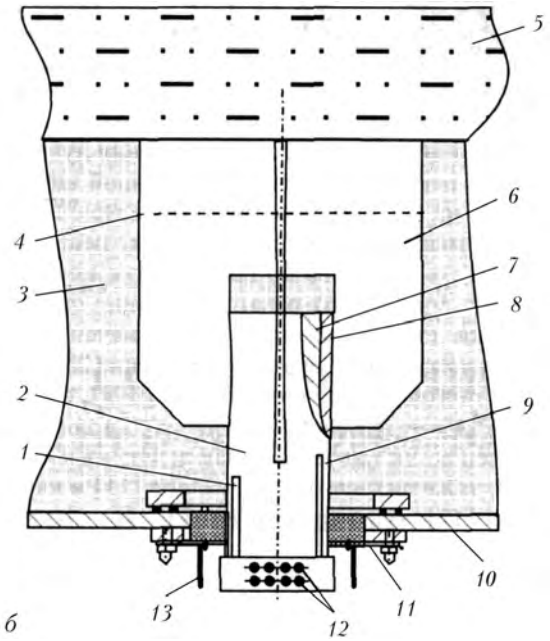


Рис. 6. Подовый электрод дуговой электропечи постоянного тока [12, 13]*: *а* — внешний вид; *б* — схема; *1* — датчик температуры; *2* — подовый электрод; *3* — футеровка; *4* — линия резки листов при замене подины; *5* — расплав; *6* — стальные листы; *7* — медь; *8* — сталь; *9* — датчик температуры; *10* — днище печи; *11* — изолятор; *12* — каналы водоохлаждения; *13* — прибор для контроля изоляции

* Конструкция НТФ «Экта»(г. Москва, Россия).

Рис. 7. Заготовка подового электрода, состоящая из стальной трубы, заполненной способом ЭШП медью

ДППТ, работающих на ломе, металлизированном сырье и их смесях, а также установлены в 70-тонной печи фирмы «Balbao» (Испания), 135-тонной двухкатодной печи и 135-тонной шахтной печи фирмы «Hylsa Planos» (Мексика), 90-тонной печи фирмы «ABC Danarc Plus» (Италия). Расстояние от воды до жидкой стали в этих печах составляет от 100 до 180 мм. Использование указанных подовых электродов позволило сократить затраты производства на огнеупоры, улучшить перемешивание ванны путем оптимизации размещения анодов в подине печи. Стойкость их составляет 2000…5300 плавок [11].

На территории России в печах ДППТ применяют подовые электроды, внешний вид и схема которых представлены на рис. 6 [12, 13].

Подовый электрод представляет собой стальные листы, проходящие через подину печи. Стальные листы приварены к базе подового электрода, состоящей из стальной трубы, внутренняя часть которой способом ЭШП заполнена медью (рис. 7).

Под корпусом печи выполнены каналы охлаждения. Внутри базы размещены датчики контроля температуры. Конструкция взрывобезопасна, поскольку каналы охлаждения вынесены за пределы печи, а состояние подового электрода непрерывно контролируют. Надежный контакт меди и стали обеспечивают способом электрошлакового литья. При замене футеровки стальную часть подового электрода обрезают и приваривают новую.

Сварку между стальными листами и базой легко осуществить, поскольку они выполнены из однородного материала. Подовые электроды описанной конструкции безаварийно работают от 2 до 5 лет на агрегатах ОАО «Курганмашзавод» (две шеститонные ДППТ), ОАО «Тяжпрессмаш» (вместимость печи 22…30 т), ПО «Ижсталь» (30-тонная печь), ОАО «Электросталь» (шеститонная печь), ОАО «ГАЗ» (12-тонная печь), ОАО «Костромамотордеталь» (две печи вместимостью по 3 т каждая), ОАО «Ступинская металлургическая компания» (печь вместимостью 0,5 т), ОАО «Дорогобушкотломаш» (1,5-тонная печь) и других предприятий России.

На территории Украины в агрегатах ДППТ применяют стержневые водоохлаждаемые сталемедные подовые электроды (рис. 8)*.

Стальная верхняя часть такого электрода контактирует с жидким металлом и в процессе работы частично оплавляется, а медная нижняя располагается ниже плавильной зоны и охлаждается водой.

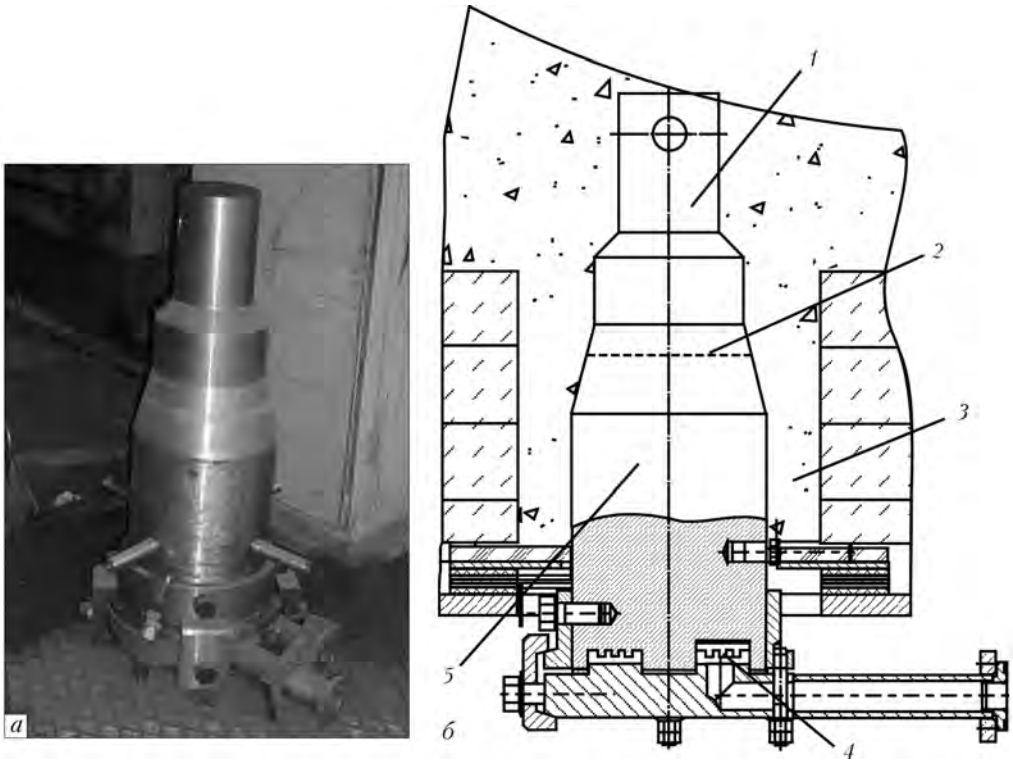


Рис. 8. Сталемедный подовый электрод: *а* — внешний вид; *б* — схема; *1* — стальная часть электрода; *2* — зона соединения стали с медью; *3* — футеровка печи; *4* — каналы водоохлаждения; *5* — медная часть электрода

* Конструкция ЧП «Роуд» (г. Донецк, Украина).

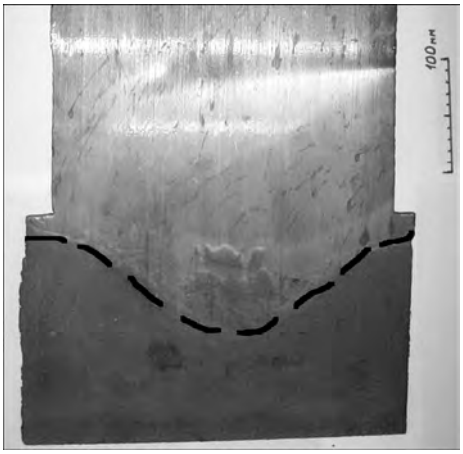


Рис. 9. Продольный макротемплет сталемедного слитка (штриховая линия проведена по переходной зоне сталь–медь)

Рис. 10. Микроструктура (×50) переходной сталемедной зоны

Для контроля температуры медной части электрода используют два термоэлектрических преобразователя. С их помощью температуру воды поддерживают на уровне не выше 80 °С, поскольку при более высокой температуре обнаружено выпадение на рабочей поверхности каналов охлаждения солей жесткости, что снижает теплоотдачу от медной части к воде и является недопустимым.

Ранее такие подовые электроды получали из отдельно прокатанных стальных и медных заготовок, в последующем соединенных между собой способом ручной сварки и прошедших механическую обработку до чистового размера. Такая технология производства данных электродов весьма затруднительна из-за проблем сварки стали и меди больших сечений.

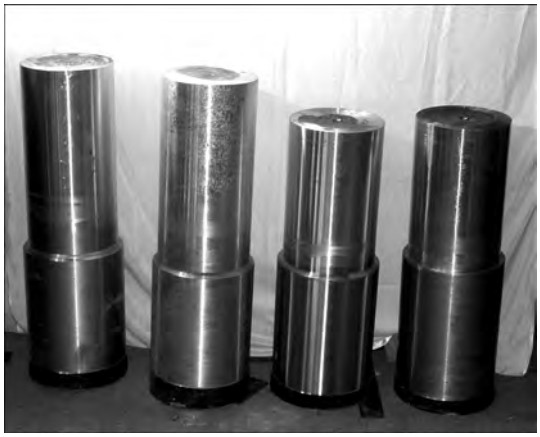


Рис. 11. Заготовки сталемедных подовых электродов

Для изготовления заготовок анодов указанной конструкции создана технология ЭШП. Применение электрошлаковых технологий весьма эффективно при производстве различных биметаллов [14]. Поэтому нами предпринята попытка использовать недавно разработанную технологию ЭШП дуговой сварки (ДС) со сменой электродов по ходу плавки для получения сталемедных заготовок подовых электродов [15, 16].

Создатели данной конструкции подового электрода поставили перед собой задачу уменьшить протяженность переходной зоны между стальной и медной частями. С этой целью проведены работы* по выплавке сталемедных слитков диаметром 350 мм с различным распределением мощности между расходуемым и нерасходуемым электродами (токоведущим кристаллизатором) при ЭШП ДС. На рис. 9 представлен продольный макротемплет заготовки электрода с оптимальным (по результатам применения в реальных ДППТ) профилем переходной зоны от стали к меди.

На рис. 10 приведена типичная микроструктура переходной зоны, а на рис. 11 — внешний вид сталемедных слитков после проточки.

Подовыми электродами описанной конструкции оснащены агрегаты таких предприятий, как ЗАО «Ферротрейдинг», Запорожье (12-тонная печь); ОАО «Арселор Миттал Кривой Рог» (агрегаты вместимостью 0,5; 3 и 6 т); ОАО «Запорожский алюминиевый комбинат» (вместимость печи 12 т); ОАО «Завод Днепропресс», г. Днепропетровск и других. Их промышленная эксплуатация продолжается без замены уже более 4 лет.

1. *http://*www.expert.ru/printissues/expert/2009/11/news_spad_priost- anovilsya.
2. *Малиновский В. С., Ярных Л. В.* Дуговые печи постоянного тока нового поколения — новый путь эффективной реконструкции металлургического машиностроения России // Металлургия машиностроения. — 2001. — № 1.— С. 12–19.

* В работах принимали участие сотрудники Института электросварки им. Е. О. Патона Б. Б. Федоровский, В. Я. Саенко, А. К. Цыкуленко, В. И. Ус, В. Б. Смолярко, В. Л. Петренко, Н. Т. Шевченко, В. А. Рябинин, Р. В. Козин, В. М. Журавель, В. В. Жуков, В. М. Ярош, а также сотрудники ЧП «Роуд» П. И. Тищенко, А. П. Тищенко.

3. *Сойфер В. М.* Новые проекты ДСП фирмы Даниэли // Электрометаллургия. — 2008. — № 4. — С. 46–48.
4. *Пути* улучшения показателей выплавки стали в малотоннажных дуговых печах / С. М. Немахин, М. М. Крутянский, А. Я. Стомахин и др. // Там же. — 2007. — № 7. — С. 2–7.
5. *Филиппов А. К., Крутянский М. М., Фарнасов Г. А.* Использование электропечей постоянного тока в металлургии // Сталь. — 2002. — № 1. — С. 33–37.
6. *http://*www.toledo.ru/part3/Premier-pech.
7. *Сазонов В., Смирнов А.* Печной типаж // Металл. — 2004. — № 10. — С. 35.
8. *Каплун М. Я., Кобря Н. В.* Подовые электроды плавильных печей // Электротехн. пром-ть. Сер. Электротермия. — 1983. — Вып. 4. — С. 9–10.
9. *Каплун М. Я., Кобря Н. В.* Подовые электроды плавильных печей // Там же. — 1983. — Вып. 6. — С. 27–29.
10. *Степанова В. Ю.* Подові електроди (короткий огляд) // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра: Зб. наук. робіт студентів і випускників кафедри ФХОТМ. — Київ: Політехніка, 2007. — С. 46–50.
11. *Симонян Л. М., Котельников Г. И.* / Дуговые печи постоянного тока: настоящее и будущее // Сталь. — 1994. — № 5. — С. 44.
12. *Высоконадежный* подовый электрод для дуговых сталеплавильных печей постоянного тока / Ю. И. Зиннуров, Ю. Н. Тулуевский, В. С. Лобанов и др. // Металлург. — 1988. — № 6. — С. 48–49.
13. *Малиновский В. С.* Энерготехнологические возможности дуговых печей постоянного тока нового поколения // Электрометаллургия. — 2007. — № 7. — С. 8–14.
14. *Электрошлаковая* технология в производстве биметаллических заготовок / Б. Е. Патон, В. Я. Саенко, Л. Б. Медовар и др. // Современ. электрометаллургия. — 2004. — № 2. — С. 8–11.
15. *Патон Б. Е.* Современные достижения ИЭС им. Е. О. Патона в области сварки и родственных процессов // Там же. — 2004. — № 2. — С. 3–18.
16. *Чернец А. В.* Новые электрошлаковые технологии с распределением плавления и затвердевания металла: Дис. … д-ра техн. наук. / НАН Украины. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона. — Киев, 2001.— 352 с.

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

Поступила 08.04.2009

НОВАЯ КНИГА

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И РОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ:

Сб. тр. четвертой междунар. конф.

(27–30 мая 2008 г., пос. Кацивели, Крым, Украина). — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2009. — 181 с.

В сборнике представлены доклады четвертой международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», в которых отражены достижения в области математического моделирования физических явлений, протекающих при сварке, наплавке и других родственных процессах, достигнутые в последние годы. Авторами докладов являются известные специалисты из различных стран мира.

Для научных и инженерно-технических работников, занятых в области сварки, резки, наплавки, пайки, нанесения защитных покрытий и других родственных процессов.

УДК 669.187.56.001.1

ИЗВЛЕЧЕНИЕ МЕДИ ИЗ ШЛАКОВ МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ДШП и ЭШП

В. А. Рябинин, Ю. С. Гришко, В. Я. Саенко, В. А. Зайцев, В. М. Журавель, В. М. Ярош

Приведены результаты экспериментальных плавок, подтверждающие возможность извлечения меди из шлаков, кусковых и пылеобразных отходов медеплавильного производства при использовании дуго- и электрошлакового процессов. Показаны доля извлечения меди, достигающая 97,9 %, и ее содержание в слитке — 93...99,6 %.

Results of experimental melts, confirming the possibility of extraction of copper from slags, lumpy and dusty wastes of copper melting production in application of processes of arc and electroslag melting are given. The percentage of copper extraction, reaching 97.9 % and its content in ingot — 93...99.6 %, is shown.

Ключевые слова: *утилизация; медьсодержащие шлаки; флюс; дугошлаковый переплав; электрошлаковый переплав; извлекающая фаза; межфазное натяжение; твердофазный восстановитель*

В металлургической отрасли промышленности и в Украине, и за рубежом появился ряд острых проблем с использованием труднoперерабатываемого (забалансового) сырья: первичного, техногенного (преимущественно оксидного), текущих и лежалых шлаков, пыли, кеков, клинкеров, содержащих значительное количество ценных компонентов. Во многих литературных источниках отмечены причины недостаточно высокого уровня развития производства цветной металлургии в СНГ, по сравнению с развитыми странами. Только 30 % применяемых технологических схем соответствуют мировому уровню, 28 % являются устаревшими и не имеют резервов для модернизации. Так, средняя энергоемкость производства меди, цинка, алюминия выше на 20...30 %, средняя производительность труда ниже в 2...3 раза, негативное суммарное воздействие на природную среду больше в 2 раза, по сравнению с металлургией США, стран ЕС, Японии [1, 2].

Таким образом, основной задачей отрасли является внедрение новейших современных технологий. На предприятиях стран СНГ в медно-никелевой подотрасли таковыми являются следующие виды плавки: кислородно-факельная, в жидкой ванне (печь Ванюкова), финская взвешенная, в вертикальном агрегате с верхним дутьем.

Меньший обьем выделяющих газов делает электрическую плавку наиболее предпочтительной с экологической точки зрения, по сравнению с шахтной и отражательной плавками. Источник тепловой энергии находится внутри сырья, потому как перерабатываемый материал участвует в теплообмене в качестве сопротивления. Однако электрическая плавка не может конкурировать с автогенной сульфидных шихт, поскольку последняя сокращает до минимума энергозатраты, а также полностью утилизирует серу газов.

В металлургии тяжелых цветных металлов электрическая плавка является разновидностью пиротехнического приема специального назначения, предназначенного для извлечения полезных компонентов из отработанных шлаков, где электроэнергия служит источником тепла для плавления шихты и способом влияния на эффективное взаимодействие фаз в печном агрегате [2]. Максимальная концентрация извлекаемых веществ — в металлической фазе, минимальная — в шлаке. Малый обьем печных газов является целью применения электрической плавки, в нашем случае дуго- и электрошлакового переплавов.

Большое значение электрическая плавка имеет для переработки полупродуктов и шлаков различных типов: от автогенной плавки — на богатые штейны, до конвертерных — на аноды. Впервые технологию электропечного обеднения жидких конвертерных шлаков (ЭПОШ) ввели на комбинате «Североникель» в конце 1950-х гг., затем на НГМК, «Печенганикель» и ряде зарубежных заводов [3].

ЭПОШ стало неотъемлемой частью современного технологического процесса, благодаря использо-

© В. А. РЯБИНИН, Ю. С. ГРИШКО, В. Я. САЕНКО, В. А. ЗАЙЦЕВ, В. М. ЖУРАВЕЛЬ, В. М. ЯРОШ, 2009

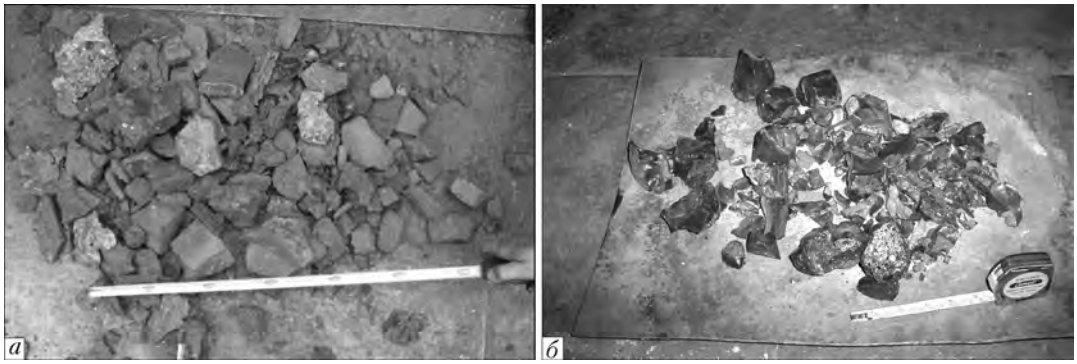


Рис. 1. Внешний вид МСШ: *а* — до; *б* — после обработки

ванию которого решают проблему извлечения меди, никеля, кобальта в одну или две стадии в присутствии восстановителя. Так, на заводе «Североникель» электрическую плавку используют для переработки текущих шлаков и техногенного сырья, запасов которых, по оценке экспертов, хватит на десять лет непрерывной работы [3]. В Финляндии на фирме «Оутокумпу» используют электропечи для обеднения шлаков взвешенной плавки.

В работе [4] отмечено, что очередной пик в производстве меди (1970–1980 гг.) пришелся на автогенные технологии. Хотя электрическая плавка теряет свои позиции при переплаве первичного сульфидного сырья тяжелых цветных металлов, она незаменима в восстановительных процессах при переработке сложных труднoперерабатываемых продуктов. Еще одно ее неоспоримое преимущество — экологически безопасное производство.

На современном этапе наиболее рациональным для обеднительной переработки шлаков, образующихся в плавильных агрегатах медеплавильных заводов, является использование электропечей.

Пирометаллургическое производство цветных металлов характеризуется высоким выходом шлаков по отношению к выплавленному металлу (10:1). Поэтому даже при содержании 0,1…2,0 % металла в шлаке общие потери составляют внушительную цифру. Так, при получении меди на пути от концентрата до готового продукта ее теряется 2 % со шлаками в пересчете на чистый металл [4].

Таким образом, следует более тщательно выбирать технологические режимы плавки с тем, чтобы свести к минимуму потери металла со шлаком. Для этого необходимо обосновать применение новых технологий извлечения ценных компонентов из медьсодержащих шлаков (МСШ) вместо того, чтобы запускать их повторно в плавильные агрегаты общего цикла. За отправную точку служат данные, касающиеся шлаков конвертерных и вторичной цветной металлургии.

Таблица 1. Состав флюсов, применяемых при ДШП и ЭШП МСШ

Марка флюса	Массовая доля компонентов, %				
	CaF_2	Al_2O_3	CaO	SiO_2	MgO
АНФ-28	41…49	Не более 5	26…32	20…24	Не более 6
АНФ-28М	40…50	–	20…40	18…32	10…20

Значительное количество оксидов железа поступает в плавильные печи с жидким шлаком, содержащим повышенное количество цветных металлов и загружаемым в плавильные агрегаты с целью обеднения. Однако этот процесс, в силу объективных причин, в существующих плавильных агрегатах происходит неполно. Поэтому целесообразно дорабатывать шлаки медеплавильного производства не в общем цикле, а в отдельных агрегатах по отдельно принятой технологии.

Особый интерес для металлургов представляют установки с непрерывным способом переработки сырья на черновую медь и белый матт [4–10]. Возможность реализации дуго- (ДШП) и электрошлакового (ЭШП) процессов применительно к указанному выше и стали основной целью представленной работы.

Технологические схемы электрошлакового переплава (ЭШП) позволяют направленно изменять режимы плавки, состав рабочего флюса, температуру и состав газовой атмосферы. Исходя из поставленных задач, фактически сводящихся к рафинированию металла от оксидов, восстановлению и защите от окисления, основным требованием является проведение стабильного процесса под флюсами, активно растворяющими образующиеся соединения окислительной стадии, а также создание условий для протекания реакции Белла-Будуара вправо, что не обеспечивается в печах открытой выплавки. Однако применение флюсов для ЭШП должно учитывать их проницаемость для восстановителя и отходящих газов (особенно в карботермической стадии процесса).

Для решения задачи утилизации конвертерных шлаков с использованием электрошлаковой технологии необходимо придерживаться следующих двух направлений:

уменьшать содержание сопутствующих металлов в МСШ путем перевода их оксидов в летучую форму или в шлак ЭШП;

обеспечивать максимально полное отделение корольков в донную фазу и восстановление присутствующих оксидов меди.

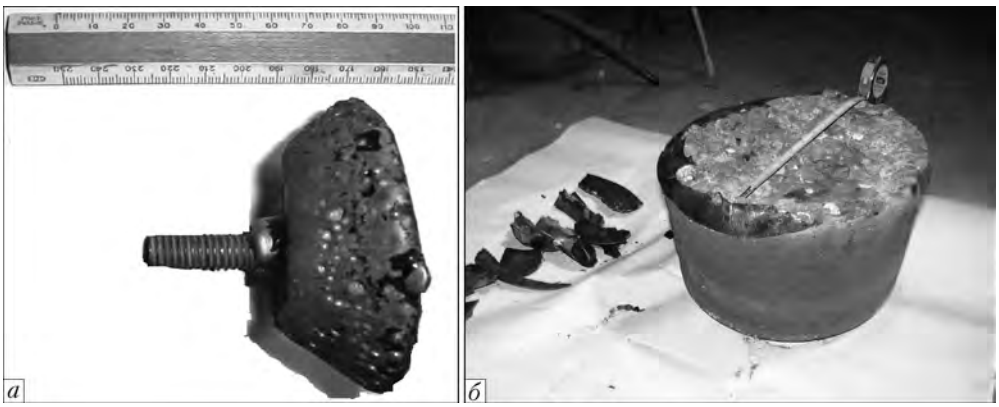


Рис. 2. Медные отливки, полученные на установках А-550 (*а*) и УШ-159 (*б*)

Технологические особенности процесса требуют соблюдения следующих условий:

применение твердого восстановителя, без перемешивания дающего малый эффект. В некоторых лабораториях используют центрифуги (уменьшается продолжительность восстановления в 3 раза), накладывают магнитное поле, но в промышленности эти идеи не нашли применения в связи с техническими сложностями, хотя в заводских условиях используют малейшую возможность вращения;

обеспечение минимальной вязкости шлака, максимального уменьшения высоты шлаковой ванны, особенно в окислительной стадии процесса для беспрепятственного удаления газовой фазы (выполнение этих условий возможно в случае использования ряда фторсодержащих флюсов электрошлакового переплава для цветных металлов и сплавов);

проведение процесса на переменном или постоянном токе (прямая полярность);

использование графитового или водоохлаждаемого электрода и графитового тигля.

К преимуществам использования твердого углерода относится отсутствие загрязнения продуктами раскисления получаемого металла (продукты раскисления в газообразной фазе), в отличие от процессов металлотермического восстановления [5].

Для ДШП и ЭШП характерны развитая удельная поверхность взаимодействия жидких расплавов шлака и металла, а также энергичное перемешивание этих расплавов благодаря электромагнитному влиянию электрического тока, проходящего через систему шлак–металл, обусловливающие наибольшую полноту протекания реакций взаимодействия металла и шлака. Это важно для реализации эффекта рафинирования металла от вредных примесей (серы, кислорода, азота).

Целью проведения эксперимента было изучение возможности получения меди из медьсодержащих шлаков (рис. 1) способами ДШП и ЭШП. После выполнения химического анализа МСШ принято решение о ходе процесса плавления. Плавки проводили в две стадии: окислительная — способом ДШП и восстановительная — способом ЭШП.

Осуществлять окислительную стадию продолжительное время не имеет смысла, поскольку содержание серы в МСШ составляет доли процента. Из расплава на данной стадии удаляются только летучие компоненты. Предлагается присутствие меди в форме Cu_2O.

ДШП и ЭШП являются активными металлургическими процессами. Большое значение для характера их протекания имеет химический состав флюса. Преимуществом представляемой технологии является использование отработанных флюсов ЭШП на основе фтористого кальция. Флюсы данной системы получили наибольшее распространение при ЭШП. В работе использованы отработанные шлаки на основе флюсов АНФ-28 и АНФ-28М, выпускаемых по ТУ 14-19-125–92 (табл. 1).

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины проведена серия опытных плавок по ДШП и ЭШП медьсодержащего шлака на установке А-550 с диаметром тигля 150 мм, а также в графитовом тигле диаметром 350 мм на установке УШ-159 с последующей заливкой в кокиль*. Загрузку МСШ в тигель производили порциями. По

Таблица 2. Сравнительный анализ плавок

Тип установки	Масса, кг			Доля извлечения меди из шлака, %	Массовая доля полученного металла, %					
	МСШ	флюса ЭШП АНФ-28	слитка ЭШП		Fe	Sn	Pb	Ni	Zn	Cu
А-550	7,0	1,5	1,08	68,0	0,94	3,9	2,1	–	0,06	93,0
УШ-159	50,0	20,0	10,5	97,9	0,29	0	0	0,03	0,08	99,6

* В работе принимали участие Р. В. Козин, В. В. Жуков.

Таблица 3. Массовая доля оксидов в медьсодержащем шлаке, %

CuO	MgO	Al_2O_3	SiO2	P_2O_5	K2O	CaO	Fe_2O_3	TiO2	Cr_2O_3	MnO	NiO	ZnO	SnO2	PbO	WO_3	Остальное
До плавки																
21,2	2,91	7,8	11,1	3,23	0,22	14,6	20,1	1,53	0,74	0,49	0,60	8,7	2,64	3,43	0,23	0,48
После плавки																
1,19	1,08	7,5	15,8	2,39	0,17	36,8	19,6	0,52	0,09	1,08	0,27	7,8	1,15	1,98	0,22	0,40

ходу плавки фиксировали количество загружаемых флюса и восстановителя, а также значение температуры. Через равные промежутки времени (после загрузки и расплавления порции МСШ) отбирали пробы шлака и металла для химического анализа. Кроме того, в плавках контролировали массы переплавленного флюса и полученного слитка, а также исходного и конечного шлака.

В результате эксперимента получен ряд слитков, массой от 1,0 до 10,5 кг. На рис. 2 представлены медные отливки массой 1,08 кг (рис. 2, *а*) и 10,5 кг (рис. 2, *б*). Химический анализ показал, что содержание меди составляет соответственно 93,0 и 99,6 %. При этом коэффициент извлечения меди в первом случае 68, во втором — 97,9 % (табл. 2).

В табл. 3 представлен полный химический анализ МСШ до и после плавок. Следует обратить внимание не то, что остаточное содержание меди в переработанном шлаке не превышает 1 %.

Выводы

1. Исследована возможность восстановления меди из МСШ путем сочетания способов ДШП и ЭШП. Максимальная доля извлечения меди достигала 97,9 %, ее содержание в металле составляло 93,0...99,6 % в зависимости от химического состава исходного МСШ и режима плавки.

2. Установлено, что остаточное содержание меди в шлаке после плавки МСШ не превышало 1 %, а это позволяет использовать шлак в качестве строительного материала.

1. *Электрошлаковый* металл / Под ред. Б. Е. Патона и Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1981. — 667 с.
2. *Тарасов А. В., Парецкий В. М.* Современный взгляд на роль электроплавки в производстве тяжелых цветных металлов // Электрометаллургия. — 2003. — № 5. — С. 12–23.
3. *Освоение* технологии плавки техногенного сырья на комбинате «Североникель» / М. Г. Блатов, Л. Н. Ерцева, М. Г. Русаков, К. И. Мосионзд // Там же. — 2003. — № 4. — С. 2–6.
4. *Гречко А. В.* Электропечи в пирометаллургическом производстве меди // Там же. — 2001. — № 3. — С. 15–17.
5. *Лютый И. Ю., Латаш Ю. В.* Электрошлаковая выплавка и рафинирование металлов. — Киев: Наук. думка, 1982. — 188 с.
6. *Панфилов А. П.* Извлечение цветных металлов из нецелевых продуктов металлургии при плазменно-дуговой плавке // Электрометаллургия. — 2001. — № 12. — С. 24–29.
7. *Ванюков А В., Зайцев В. Я.* Теория процессов пирометаллургии. — М., Металлургия, 1974. — 460 с.
8. *Циклонные* печи // Черные металлы. — 1977. — № 20. — 34 с.
9. *Новожилов А. Б., Кирилин И. И., Гречко А. В.* Плавка на черновую медь медных шихт // Цветные металлы. — 1996. — № 9. — С. 18–19.
10. *Ханиала П., Койо И.* Технология взвешенной плавки // Там же. — 1996. — № 10. — С. 22–25.

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

Поступила 09.04.2009

УДК 669.117.56

ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЕ ЛИТЬЕ ЗАГОТОВОК КОРПУСОВ ФЛАНЦЕВЫХ ЗАДВИЖЕК С ПРИПЛАВЛЕНИЕМ ПАТРУБКОВ

М. А. Полещук, Л. Г. Пузрин, В. Л. Шевцов, А. И. Бородин

Разработан технологический процесс производства заготовок корпусов задвижек способом электрошлакового литья с приплавлением заранее изготовленных патрубков с фланцами. Такие задвижки широко используются при добыче нефти и газа фонтанным способом под давлением до 70 МПа. Новый технологический процесс обеспечивает получение высококачественных заготовок корпусов задвижек из среднеуглеродистых легированных сталей. Механические свойства металла всех частей заготовок превосходят требования стандарта к поковкам из таких сталей. Освоено серийное производство трех типоразмеров заготовок корпусов с рабочим каналом 50, 65 и 80 мм.

Technological process of production of billets of stop valve bodies using the method of electroslag casting with a melting-on of earlier manufactured pipe branches with flanges has been developed. These s are widely used in production of oil and gas by Christmas-tree method under pressure of up to 70 MPa. The new technological process provides the producing of high-quality billets of stop valve bodies of medium-carbon alloyed steels. Mechanical properties of metal of all parts of billets are superior to those required by standard to forgings of these steels. The serial production of three types and sizes of billets of bodies with a working channel of 50, 65 and 80 mm is implemented.

Ключевые слова: *корпуса фланцевых задвижек; электрошлаковое литье с приплавлением; качество соединения; механические свойства металла корпусов*

Задвижки с фланцами на концах патрубков присоединяют к технологическому оборудованию и трубопроводам с помощью резьбовых шпилек. Такой тип задвижек необходим для их установки и демонтажа на оборудовании без огневой резки и сварки. Особенно это важно при добыче нефти и газа, которые при воспламенении могут приводить к экологической катастрофе. Фланцевые задвижки являются основными элементами фонтанной арматуры, устанавливаемой на устье каждой скважины для добычи нефти и газа фонтанным способом. Месторождения нефти и газа, осваиваемые в Украине в настоящее время, находятся на большой глубине. При этом давление добываемого продукта на устье скважины может достигать 70 МПа и более [1].

Фланцевые задвижки, работающие при таком высоком давлении, должны быть абсолютно надежны. Поэтому заготовки корпусов указанных задвижек (рис. 1) изготовляют из стали не обычным литьем, а при помощи ковки или штамповки. Деформированный металл отличается от литого более высокими значениями плотности, прочности, пластичности и вязкости. Вместе с тем переход на производство корпусов задвижек способом ковки значительно удорожает их изготовление из-за необходимости применения дорогостоящих оборудования и оснастки, а также значительного увеличения объема последующей механической обработки [2].

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины в качестве альтернативы ковке разработал технологию электрошлакового литья (ЭШЛ) заготовок корпусов задвижек с фланцами на концах патрубков. При изготовлении способом ЭШЛ изделий с такой сложной конфигурацией наружной поверхности ось корпуса, проходящую через фланцы,

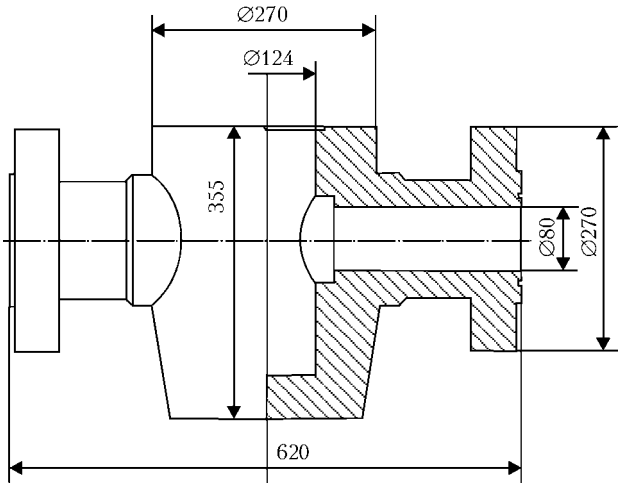


Рис. 1. Корпус фланцевой задвижки для работы при давлении 70 МПа

© М. А. ПОЛЕЩУК, Л. Г. ПУЗРИН, В. Л. ШЕВЦОВ, А. И. БОРОДИН, 2009

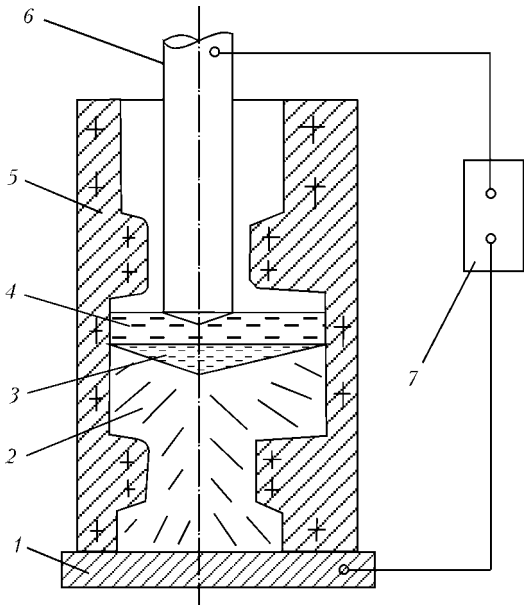


Рис. 2. Схема ЭШЛ заготовок корпусов задвижек с фланцами на концах патрубков: *1* — поддон; *2* — выплавляемая заготовка; *3* — металлическая ванна; *4* — шлаковая ванна; *5* — кристаллизатор; *6* — расходуемый электрод; *7* — источник питания

располагали при плавке вертикально (рис. 2). При таком способе ЭШЛ в составном кристаллизаторе последовательно формируют нижний фланец, патрубок и центральную часть корпуса, а затем верхние патрубок и фланец. На опытном заводе института освоили промышленный выпуск заготовок корпусов фланцевых задвижек из сталей 38ХМ и 40ХН2МА с диаметром проходного канала 80 и 50 мм [3, 4].

Исследование качества электрошлаковых корпусов фланцевых задвижек показало, что значения механических свойств их литого металла превосходят требуемые стандартами к обычному деформированному металлу. Кроме того, литые электрошлаковые корпуса имеют значительно более низкую анизотропию механических свойств, чем корпуса фланцевых задвижек из кованого металла. Благодаря высоким значениям пластических свойств литые электрошлаковые корпуса лучше противостоят хрупкому разрушению и отличаются более высокой надежностью при работе [4, 5].

Однако, как показал опыт, использование этого способа при серийном производстве заготовок корпусов фланцевых задвижек вызывает ряд трудностей. Во-первых, в связи с резким изменением по ходу плавки площади поперечного сечения плавильного пространства необходимо соответствующим образом регулировать электрический режим процесса. Поэтому качественную выплавку таких заготовок могут осуществлять только плавильщики самой высокой квалификации. Во-вторых, несимметричная конструкция отдельных частей составного кристаллизатора способствует появлению в них тепловых остаточных деформаций, увеличивающихся от плавки к плавке. Из-за нарастающей деформации требуется проведение текущих ремонтов медного кристаллизатора через каждые 10… 15 плавок, а полный срок его службы не превышает 50…70 плавок. В результате в современных условиях стоимость изготовления заготовок корпусов значительно возрастает.

Данные обстоятельства способствовали разработке новой технологии изготовления заготовок корпусов фланцевых задвижек, предусматривающей приплавление заранее изготовленных патрубков с фланцами к центральной части заготовки корпуса задвижки при ее электрошлаковой отливке. Выплавка только центральной части заготовки значительно проще, чем ЭШЛ заготовки корпуса задвижки в целом. Схема этого процесса приведена на рис. 3.

Процесс ЭШЛ с приплавлением, объединяющий возможности ЭШЛ и электрошлаковой сварки (ЭШС), разработан ранее в Институте электросварки им. Е. О. Патона для изготовления заготовок сложной формы. В промышленности указанным способом освоены производство кривошипов коленчатых валов мощных судовых дизелей [6–8], выплавка патрубков на толстостенных сосудах парогенераторов и сепараторов пара энергоблоков атомных электростанций [9, 10] и некоторых других изделий [11].

Упомянутые изделия изготовляли в основном из хорошо сваривающихся низкоуглеродистых сталей марок 20, 20Г и 22К. В то же время корпуса фланцевых задвижек, работающие при высоком давлении, требуют применения легированных среднеуглеродистых сталей, таких как 38ХМ, 40Х, 40ХН2МА. Эти стали отличаются более высокой прочностью, но из-за возможного образования трещин в шве и околошовной зоне являются трудносвариваемыми при дуговом способе.

Подобные марки стали соединяют способом ЭШС. Это оказывается возможным благодаря растянутому во времени термическому циклу сварки и применению низкоуглеродистой присадочной проволоки. Например, станины прокатных станов из среднеуглеродистой стали 35Л, а также цилиндры гидропресса из легированной стали 35НМ сваривают низкоуглеродистой проволокой одной и той же марки Св-10Г2 [12]. Эти изделия допускают выполнение при ЭШС менее прочных швов. В то же время корпус и патрубки с фланцами задвижки, работающей при высоком давлении, должны изготовляться из трудносвариваемой стали, способной обеспечить необходимую прочность изделия. Вследствие малой скорости ЭШЛ термический цикл в приплавляемых деталях еще более растянут во времени, чем при ЭШС. Это обстоятельство позволило получать при ЭШЛ с приплавлением заготовки корпусов фланцевых задвижек сталей повышенной прочности без трещин в зоне соединения.

Экспериментальные работы по созданию технологии ЭШЛ с приплавлением проводили применительно к заготовкам корпусов фланцевых задвижек с рабочим каналом диаметром 80 мм (Ду-80). Задвижки Ду-80 являются основными в большинстве

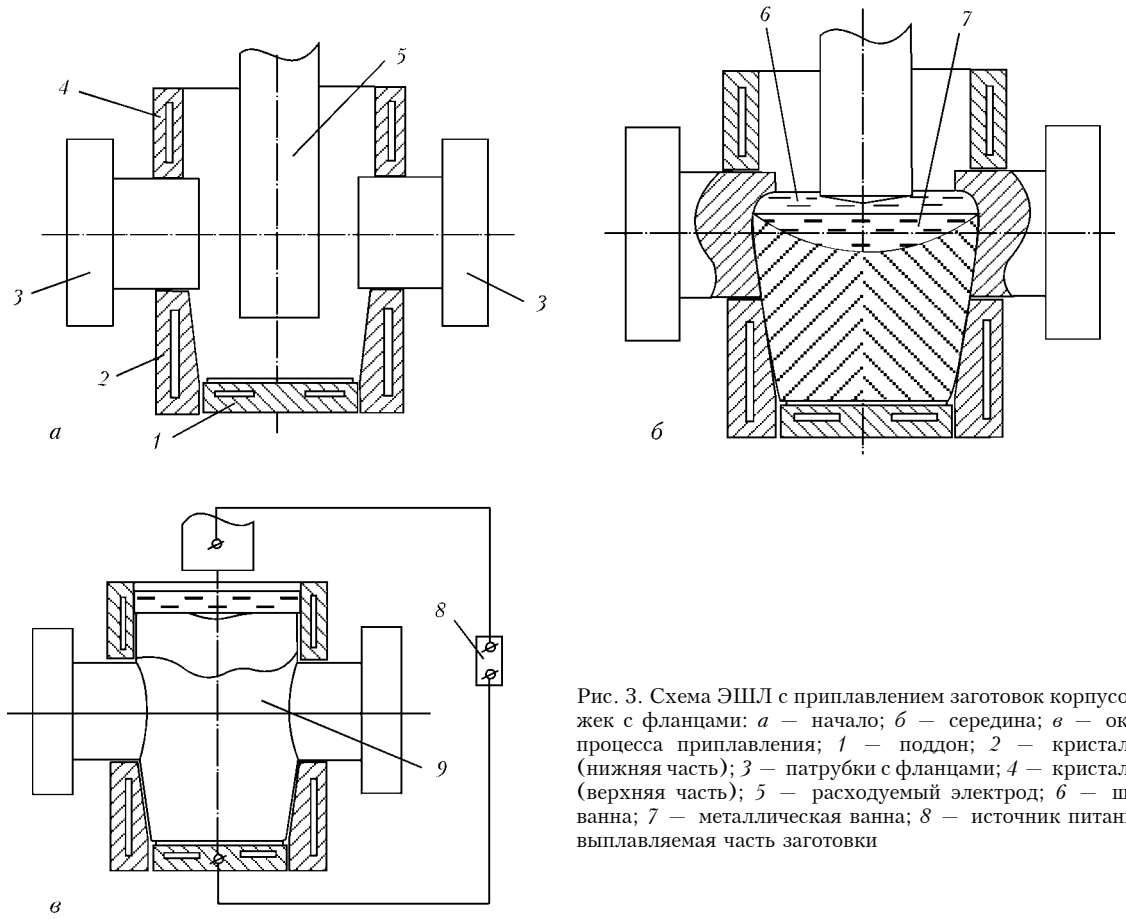


Рис. 3. Схема ЭШЛ с приплавлением заготовок корпусов задвижек с фланцами: *а* — начало; *б* — середина; *в* — окончание процесса приплавления; *1* — поддон; *2* — кристаллизатор (нижняя часть); *3* — патрубки с фланцами; *4* — кристаллизатор (верхняя часть); *5* — расходуемый электрод; *6* — шлаковая ванна; *7* — металлическая ванна; *8* — источник питания; *9* — выплавляемая часть заготовки

схем фонтанной арматуры. Разработана и изготовлена специальная оснастка, представляющая собой медный кристаллизатор с токоподводящим водоохлаждаемым поддоном, состоящий из двух частей с индивидуальным охлаждением, устанавливаемых друг на друге. Разъем между ними находится в горизонтальной плоскости, проходящей через ось патрубков. Внутренняя полость кристаллизатора соответствует форме наружной поверхности центральной части корпуса. С двух противоположных сторон у разъема в обеих частях кристаллизатора выполнены полукруглые выборки, образующие отверстия для размещения в них заготовок патрубков с фланцами.

В экспериментах для ужесточения условий получения качественного приплавления использовали сталь 40Х, отличающуюся пониженной пластичностью, по сравнению со сталями того же класса, содержащими никель и молибден. Патрубки с фланцами предварительно изготовляли с применением ковки или механической обработки катаной заготовки. Перед началом плавки в отверстия кристаллизатора патрубки устанавливали так, чтобы их торцы выступали в плавильное пространство (рис. 3, *а*).

В кристаллизатор вводили расходуемый электрод, включали источник питания, наводили шлаковую ванну и начинали процесс плавления металла и формирования заготовки. В ходе ЭШЛ выступающие в плавильное пространство концы патрубков подогревались за счет излучения поверхности шлака. Однако их оплавление начиналось только при непосредственном контакте с расплавленным шлаком. Расплавленный металл стекал с торцов патрубков, образуя общую металлическую ванну с выплавляемой заготовкой (рис. 3, *б*).

По мере выплавки заготовки уровень расплавленного металла поднимается вверх вдоль торцов патрубков. Из-за интенсивного теплоотвода в стенки кристаллизатора общая металлическая ванна затвердевает, и заготовка сплавляется с патрубками. В дальнейшем при выплавке верхней части корпуса задвижки протекает обычный процесс ЭШЛ. После формирования всей заготовки источник питания отключают и остаток расходуемого электрода удаляют из кристаллизатора (рис. 3, *в*).

При ЭШЛ с приплавлением заготовки корпуса фланцевой задвижки площадь поперечного сечения кристаллизатора, в котором формируется средняя часть заготовки, мало изменяется по высоте. В таком кристаллизаторе сохраняются условия затвердевания металла, которые характерны для классического электрошлакового переплава. Это обеспечивает получение стабильных служебных свойств заготовки ЭШЛ высокого уровня, не уступающих таковым деформированного металла обычного производства [13, 14]. Поэтому при отработке технологии главное внимание уделяли надежному приплавлению патрубков без трещин и несплавлений, а также формированию по всему периметру соединений равномерных галтелей. Качество зоны приплавления патрубков заготовок корпусов фланце-

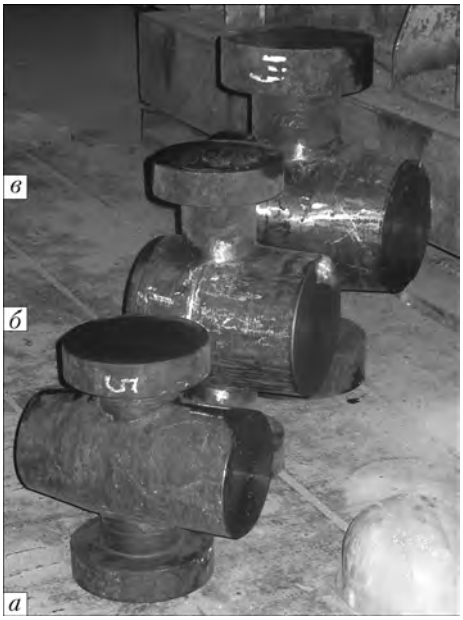


Рис. 4. Внешний вид заготовок корпусов фланцевых задвижек, полученных способом ЭШЛ с приплавлением: *а* — Ду-65 на давление 35 МПа; *б* — Ду-50 на давление 70 МПа; *в* — Ду-80 на давление 70 МПа

вых задвижек определяли методами ультразвукового контроля и цветной дефектоскопии. Для этого заготовки после выплавки подвергали отжигу. Затем механически обрабатывали поверхности, через которые в металл вводили ультразвуковой сигнал, далее зачищали галтели.

В связи с разными условиями подвода и отвода теплоты проплавление нижних и верхних частей торцов патрубков было не одинаковым. Провар в верхней части патрубка существенно больше, чем в нижней. Это обусловлено тем, что в начале процесса приплавления теплота от шлаковой ванны к патрубку передается через поверхность небольшой площади, а сам патрубок еще не прогрет. В конце процесса теплота от шлаковой и металлической ванн и части выплавленной заготовки поступает в патрубок через весь торец, уже достаточно прогретый. Глубина провара зависит от электрического режима процесса плавления расходуемого электрода, массы патрубков и условий теплоотвода от их боковой поверхности.

При малом проваре в нижней части патрубков и по его бокам могут образовываться несплавления. В таких местах галтель не формируется, а между патрубком и литым металлом может оставаться затвердевший шлак. При большом проваре расплавление верхней части патрубков может распространяться далеко в глубь отверстий в охлаждаемой стенке кристаллизатора и даже выходить за его пределы. В этом случае возможно проплавление боковой поверхности патрубка и вытекание расплавленного металла.

Разработанная технология ЭШЛ фланцевых задвижек позволила полностью исключить опасность появления указанных выше дефектов, а также трещин в зоне соединения благодаря тщательной отработке технологического режима процесса, обеспечивающего оптимальную глубину провара патрубка.

Внешний вид трех типоразмеров заготовок корпусов задвижек, полученных ЭШЛ с приплавлением, приведен на рис. 4.

Исследование качества металла заготовок корпусов задвижек в зоне приплавления после закалки с отпуском проводили на вертикальных темплетах, вырезанных вдоль продольной оси патрубков. При визуальном контроле темплетов после их травления для выявления макроструктуры четко прослеживается линия сплавления и прилегающие к ней области с различным типом кристаллов. На линии сплавления отсутствуют непровары, трещины и другие дефекты. Из этих темплетов изготовляли образцы для определения механических свойств металла в зоне соединения, металла патрубка и литого металла (вдоль и поперек оси отливки). Результаты механических испытаний приведены в таблице.

Как видно из таблицы, значения механических свойств металла всех частей заготовки задвижки, полученной способом ЭШЛ с приплавлением, превышают требуемые стандартом на поковки из стали 40Х. Особенно более высокими являются пластич-

Механические свойства металла заготовки корпуса задвижки Ду-80 из стали 40Х

Место (направление) вырезки образцов	$s_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	Ψ, %	*KCU*, Дж/см^2
Металл патрубка	550,1…567,2 / 558,6	725,5…738,2 / 731,8	20,0…20,7 / 20,3	56,0…57,6 / 56,8	86,1…107,7 / 96,9
Линия сплавления	542,5…544,7 / 543,6	712,0…717,6 / 714,8	18,3…22,7 / 20,5	68,2…69,9 / 69,0	152,2…158,0 / 155,1
Литой металл (поперечное)	581,8…615,2 / 598,5	759,8…777,7 / 768,7	16,3…20,3 / 18,3	39,4…51,2 / 45,3	84,9…85,9 / 85,4
Литой металл (продольное)	573,1…581,4 / 577,2	743,1…743,8 / 743,4	19,3…21,7 / 20,5	51,2…57,3 / 54,5	101,7…111,0 / 106,3
Поковки (стандарт)	≥490	≥655	≥13	≥35	≥44

Примечания: 1. В числителе указан разбег значений, в знаменателе — средние.
2. Надрез на образцах выполняли по линии сплавления.

Рис. 5. Внешний вид задвижек Ду-80 на давление до 70 МПа

ность и вязкость, а также ударная вязкость металла по линии сплавления.

С учетом положительных результатов исследований, проведенных в Институте электросварки им. Е. О. Патона, создан технологический процесс изготовления заготовок корпусов фланцевых задвижек высокого давления способом ЭШЛ с приплавлением. Инновационная фирма «ИФ Элтерм» разработала и изготовила оснастку для ЭШЛ заготовок корпусов массой от 150 до 300 кг и освоила производство фланцевых задвижек, используемых при добыче нефти и газа (рис. 5). Способ ЭШЛ с приплавлением, по сравнению с освоенной ранее электрошлаковой отливкой всего корпуса, резко снижает энергозатраты и повышает производительность процесса вследствие уменьшения массы переплавляемого металла. При новом способе используют кристаллизаторы более простой формы и меньших размеров, срок службы которых превышает 500 плавок. Все это намного уменьшает стоимость выплавляемых заготовок и увеличивает их конкурентоспособность, что особенно важно в современных экономических условиях.

1. *Вайсберг Г. Л., Римчук Д. В.* Фонтанна безпека. Запитання. Відповіді. — Харків, 2002. — 474 с.
2. *Стальные* поковки вместо стального литья: Рекламный проспект фирмы «Cameron» (Выставка «Нефтегаз-90»). — М., 1990. — 12 с.
3. *Электрошлаковое* литье заготовок корпусов фонтанной арматуры высокого давления / В. Л. Шевцов, В. Я. Майданник, М. Л. Жадкевич и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1998. — № 4. — С. 3–12.
4. *Электрошлаковое* литье заготовок корпусов задвижек высокого давления / М. А. Полещук, Л. Г. Пузрин, В. Л. Шевцов и др. // Современ. электрометаллургия. — 2009. — № 1. — С. 12–17.
5. *Электрошлаковое* литье вместо ковки в производстве фонтанной арматуры высокого давления / В. Л. Шевцов, М. Л. Жадкевич, В. Я. Майданник и др. // Там же. — 2003. — № 3. — С. 3–8.
6. *Патон Б. Е., Медовар Б. И., Бойко Г. А.* Электрошлаковое литье. Обзор — М.: НИИМАШ, 1974. — 70 с.
7. *Опыт* применения технологии электрошлакового литья в производственном объединении «Брянский машиностроительный завод» / Л. В. Попов, С. С. Анциферов, Г. А. Бойко и др. // Электрошлаковая технология. — Киев: Наук. думка. — 1983. — С. 118–122.
8. *Гончаров И. Т., Егоров С. П.* Исследование усталостной прочности кривошипов коленчатых валов судовых дизелей, изготовленных методом электрошлакового литья // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1984. — № 21. — С. 39–41.
9. *Новый* прогрессивный технологический процесс изготовления патрубков на корпусах оборудования АЭС методом электрошлаковой выплавки / Б. Е. Патон, Л. В. Тупицын, Ю. В. Соболев и др. // Энергомашиностроение. — 1977. — № 1. — С. 27–29.
10. *Фойта А., Розкошны К.* Опыт электрошлаковой выплавки патрубков компенсатора объема // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1988. — № 1. — С. 37–43.
11. *Жадкевич М. Л., Шевцов В. Л., Пузрин Л. Г.* Электрошлаковое литье с приплавлением. Обзор // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 3. — С. 12–16.
12. *Электрошлаковая* сварка и наплавка / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1980. — 511 с.
13. *Электрошлаковый* металл / Под. ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1981. — 680 с.
14. *Медовар Б. И., Цыкуленко А. К., Дяченко Д. М.* Качество электрошлакового металла. — Киев: Наук. думка, 1990. — 312 с.

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

Поступила 06.02.2009

УДК 669.187.56

ОБ АЛЬТЕРНАТИВНОМ СПОСОБЕ ПРОИЗВОДСТВА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОЛЫХ ЗАГОТОВОК В ГАЗОВОМ ТУРБИНОСТРОЕНИИ

С. В. Скрипник

Рассмотрены ковано-сварные промышленные способы получения полых заготовок деталей и узлов газовых турбин. Проанализировано поведение сварных швов на примере некоторых жаропрочных сварных конструкций. Предложен альтернативный способ получения крупногабаритных центробежных электрошлаковых заготовок вместо ковано-сварного. Приведены примеры эффективного использования электрошлаковых заготовок в турбомашиностроении.

Forging-welding industrial methods of producing billets of parts and sub-assemblies of gas turbines are considered. The behavior of welds on the example of some heat-resistant welded structures is analyzed. Alternative method for producing large-sized centrifugal electroslag billets instead of forged-welded ones is offered. Examples of effective application of electroslag billets in turbine manufacturing are given.

Ключевые слова: *хромоникелевые стали; центробежное электрошлаковое литье; сварка; структура; аустенит; мартенсит; феррит; газовые турбины*

В предстоящее десятилетие особенно быстро будет развиваться энергетическое газотурбиностроение — прежде всего производство газовых турбин (ГТ) большой (125…180 МВт) мощности [1]. Создание современных ГТ неразрывно связано с решением ряда сопутствующих научно-технических проблем, в частности, с улучшением технологий сварки, получением крупногабаритных полых заготовок высокого качества, разработкой высокотемпературных конструкционных материалов.

Современные ГТ имеют до 70 % полых деталей и механических узлов сложного профиля. В ГТ большой мощности размеры полых деталей и механических узлов, особенно корпусных, достигают 1000…1500 мм и более. В настоящее время такие поковки изготовляют по сложной технологической схеме, включающей выплавку металла в открытой печи, получение слитков, биллетирование, разрезку биллетов, осадку, прошивку, разгон по диаметру и раскатку.

Такие операции требуют сложной кооперации с другими предприятиями и использования уникального кузнечно-прессового оборудования. Кроме того, в случае глубокой вытяжки приходится ограничивать диаметр заготовки, а при раскатке — ее высоту. Иногда требуется сложный профиль заготовок. Поэтому в некоторых случаях производство их деформационными способами технически невозможно.

Для ГТ большой мощности экономически выгодно изготовлять корпусные конструкции со сравнительно большой толщиной и значительной конструктивной жесткостью, состоящие из нескольких поковок, соединяемых с применением сварки (рис. 1, *а*). Однако ковано-сварные технологии отличаются продолжительным циклом изготовления и большой трудоемкостью.

Химический состав некоторых жаропрочных сталей, используемых в сварных конструкциях, представлен в табл. 1. С точки зрения общей химической стойкости и эксплуатационных свойств желательно, чтобы металл сварного шва по составу и структуре не отличался от основного металла [2, 3]. Но в данном случае в высоколегированном металле сварных швов возможно образование горячих и холодных трещин. Это обусловлено такими специфическими особенностями, как развитая транскристаллитная направленность первичной структуры, увеличенная литейная усадка затвердевающего металла, значительные растягивающие напряжения, действующие на сварочную ванну в процессе его затвердевания, многокомпонентное легирование, усиливающее вероятность появления малых количеств легкоплавкой эвтектической составляющей на границе дендритов в момент завершения кристаллизации сварочной ванны [2–6].

Для получения высоколегированного металла сварных швов без трещин зачастую приходится применять присадочные материалы, отличающиеся по композиции от основного металла. В ряде случаев это де-

© С. В. СКРИПНИК, 2009

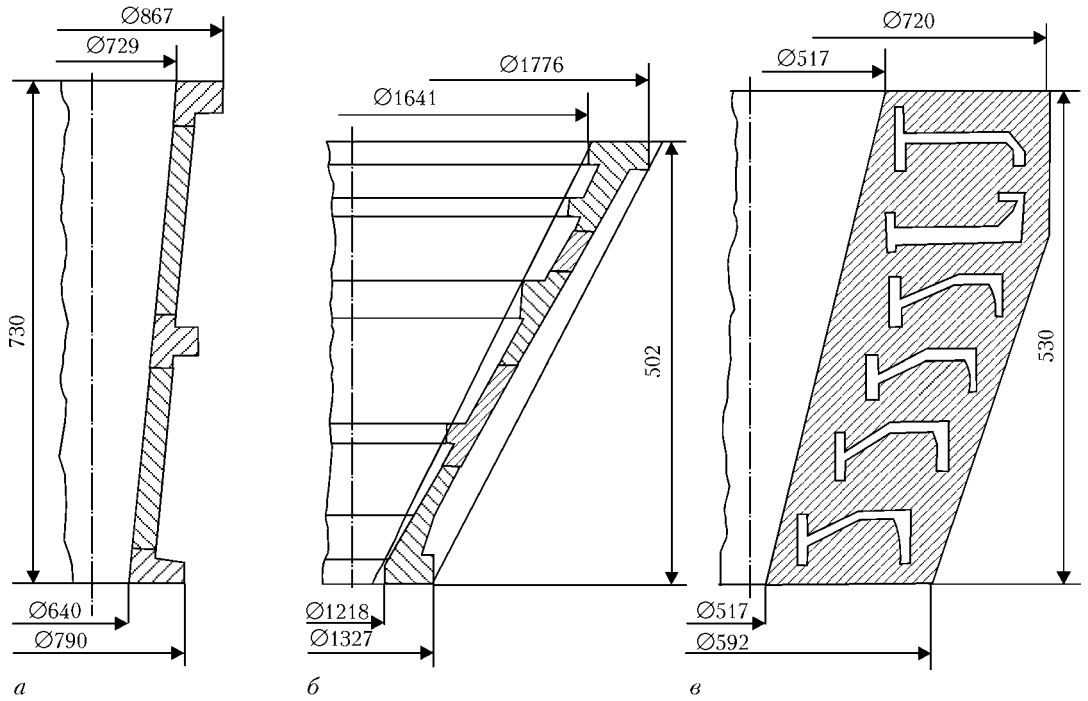


Рис. 1. Эскизы корпусных сварных конструкций компрессора (*а*), турбины (*б*), литой заготовки (*в*), предназначенной для нескольких колец спрямляющего аппарата газовой турбины

лается даже в ущерб свойствам сварного соединения.

Таким образом, имеется ряд технических трудностей как в получении бездефектных сварных соединений в жаропрочных сварных конструкциях, так и в обеспечении их химической, структурной и физической однородности.

Задача получения полых заготовок или конструкций высокого качества для ГТ остается актуальной. Успешно решить ее можно путем примене-

Таблица 1. Состав некоторых жаропрочных марок сталей и сплавов, применяемых в производстве газовых турбин

Структурный класс	Рабочая температура, °С	Марка стали	Массовая доля элементов, %											
			C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	Nb	Ti	V	S	P
Ф	Нет данных	О8Х17Т	≤0,08	≤0,8	Г0,80	16,0…18,0	–	–	–	–	5хС-0,80	–	≤0,025	≤0,035
Ф	600	15Х25Т	≤0,15	≤1,0	≤0,80	24,0…27,0	–	–	–	–	5хС-0,90	–	≤0,025	≤0,035
М	450…500	20Х13	0,16…0,25	0,20…0,80	0,30…0,80	12,0…14,0	–	–	–	–	–	–	≤0,025	≤0,030
М-Ф	580	15Х11МБФ	0,12…0,18	≤0,55	0,60…1,20	10,0…12,0	0,50…0,90	–	0,80…1,05	0,10…0,20	–	0,50…0,90	≤0,025	≤0,030
М	600	13Х11Н2В2МФ (ЭИ 961)	0,10…0,16	≤0,60	≤0,60	10,5…12,5	1,50…1,80	1,60…2,00	0,35…0,50	–	–	0,18…0,30	≤0,025	≤0,030
М	Нет данных	07Х12НМБФ (ЭП 609)	0,05…0,09	≤0,60	≤0,60	10,5…12,0	1,40…1,80	–	0,35…0,50	0,05…0,15	–	0,15…0,25	≤0,02	≤0,03
М	600…650	15Х12Н2МВФАБ (ЭП 517)	0,13…0,18	≤0,50	≤0,50	11,0…12,5	1,70…2,10	0,65…1,00	1,35…1,65	0,20…0,35	–	–	≤0,015	≤0,03
М	570	20Х12ВНМФ (ЭП 428)	0,17…0,23	≤0,60	0,50…0,90	10,5…12,5	0,50…0,90	0,70…1,10	0,50…0,70	–	–	0,15…0,30	≤0,025	≤0,030
М-Ф	Нет данных	14Х17Н2	0,11…0,17	≤0,80	≤0,80	16,0…18,0	1,50…2,50	–	–	–	–	–	≤0,025	≤0,030
А	600	10Х18Н9Т (ЭЯ1Т)	≤0,10	≤0,80	1,00…2,00	17,0…19,0	8,0…9,5	–	–	–	5хС-0,70	–	≤0,020	≤0,035
А	600	12Х18Н10Т-Ш	≤0,12	≤0,80	≤2,00	17,0…19,0	9,0…11,0	–	–	–	5хС-0,80	–	≤0,020	≤0,035
А	650…700	20Х23Н18	≤0,20	≤1,0	≤2,00	22,0…25,0	17,0…20,0	–	–	–	–	–	≤0,020	≤0,035

Рис. 2. Полая отливка ЦЭШЛ массой 0,5 т из стали 13Х11Н2В2МФ (ЭИ 961)

ния центробежного электрошлакового литья (ЦЭШЛ) полых заготовок [7].

Использовать в турбостроении крупногабаритные заготовки ЦЭШЛ можно как простой геометрической формы, например в виде толстостенного усеченного конуса, так и фасонной — с необходимым количеством различных фланцев или приливов.

Полую заготовку в виде усеченного конуса можно использовать либо как цельнолитую (вместо пяти сваренных между собой кованых деталей) для различных изделий (рис. 1, *б*), либо с последующей разрезкой на мерные кольца различного диаметра (рис. 1, *в*). Такие литые кольца могут применяться, например, как элементы спрямляющих аппаратов ГТ вместо цельнокатаных. Это позволит сократить цикл и упростить технологию изготовления, а также снизить стоимость производства.

Для опробования второго варианта изготовили полые заготовки ЦЭШЛ в виде усеченного конуса из стали 13Х11Н2В2МФ (ЭИ 961) массой 0,5 т с наружными диаметрами 720 и 517 мм и внутренними 592 и 380 мм (в обоих случаях первый размер относится к верхнему срезу, второй — к нижнему) высотой 530 мм. Указанные заготовки (рис. 2) получили на комплексе центробежного электрошлакового литья КЦЭШЛ-1 с вертикальной осью вращения формы. Каждую конусную заготовку разрезали на шесть колец. Одно из них подвергли подробным исследованиям.

Макроструктура литого кольца характеризуется высокой плотностью, однородностью и отсутствием дефектов ликвационного и усадочного происхождения, что обусловлено постепенной и направленной кристаллизацией металла под шлаком в поле центробежных сил. Микроструктура представляет собой сорбит отпуска.

Предварительная термическая обработка состояла в нормализации от температуры (1070±20) °С, выдержке 2,0…2,5 ч, воздух, а также двойном отпуске при (720±20) °С, 3…4 ч, воздух. Окончательная термическая обработка заключалась в закалке от температуры (950±20) °С, 1,2…2,0 ч, воздух, а также отпуске при (680±20) °С, воздух. Так как при электрошлаковой тигельной плавке использовали литые расходуемые электроды с добавлением металлической стружки, то важно было сравнить свойства полученных отливок с требуемыми в технических условиях.

Механические свойства металла кольца (табл. 2) оказались выше оговоренных техническими условиями на кованый металл открытой выплавки. Важно отметить высокую изотропность литого металла, что для сложнонапряженных деталей является одной из наиболее важных характеристик металла. Полученные свойства позволили использовать остальные пять литых колец из конусной заготовки в производстве. В 2008 г. комплект деталей из упомянутых литых колец установлен на газовый двигатель ДГ 90, который в настоящее время эксплуатируется в обычных производственных условиях.

Большие значения пластичности и вязкости чистой электрошлаковой стали ЭИ 961 позволили увеличить объем упрочняющей дисперсной фазы и тем самым достичь большей жаропрочности в корпусной детали из стали 15Х12Н2МВФАБ (ЭП 517).

Таблица 2. Механические свойства стали ЭИ 961 в отливке ЦЭШЛ массой 0,5 т

Металл	Направление вырезки образца	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5, %	ψ, %	*KCU*, Дж/см^2	Длительная прочность при *T* = 450 °С, ч
Отливка ЦЭШЛ	Продольное	1031…1032 / 1031,5	902…930 / 916	13,8…15,6 / 14,7	43,9…44,5 / 44,2	63,0…72,0 / 67,5	100 без разрыва
	Тангенциальное	1028…1055 / 1042	907…915 / 911	11,0…11,8 / 11,4	42,0…46,5 / 44,3	67,0…69,0 / 68,0	100 без разрыва
Требования ТУ 14-1-2918–80 на поковки (не менее)	Продольное	900	750	10,0	40,0	45	100
	Тангенциальное	850	710	7,5	32,0	35	100

Примечание. В числителе — наименьшее и наибольшие значения, в знаменателе — среднее значение по восьми образцам.

Для опробования варианта получения цельнолитой фасонной детали взамен собираемой из пяти колец по ковано-сварной технологии изготовили партию из трех крупногабаритных заготовок ЦЭШЛ стенки компрессора из стали 15Х12Н2МВФАБ (ЭП 517). Заготовки отличались сложной конфигурацией и имели на наружной поверхности три поперечные реборды различного профиля и два продольных ребра (рис. 3). Диаметры реборд составляют 890 мм, внутренняя полость большего диаметра конусных отливок — 700 мм, высота — 750 мм.

Из одной из заготовок вырезали продольный темплет и кольцевые пробы сечением 20×20 мм для исследования химического состава, макро- и микроструктуры, а также механических свойств. Химический состав заготовки соответствует требованиям технических условий для этой стали. Макроструктура заготовок — плотная, без дефектов металлургического характера. Микроструктура металла представляет собой сорбит отпуска с равномерно распределенными карбидами легирующих элементов.

Заготовки термообработали по следующему режиму: гомогенизация при (1120 ± 10) °С, 4,0…4,5 ч, воздух; гомогенизация повторно; нормализация от (1130 ± 10) °С, 1,0…1,5 ч, воздух; закалка от (1120 ± ± 10) °С, масло; отпуск при (650 ± 20) °С, 1,0…1,5 ч, воздух. Результаты механических испытаний заготовок из стали 15Х12Н2МВФАБ (ЭП 517) (табл. 3) свидетельствуют о соответствии характеристик прочности, пластичности и вязкости техническим условиям на кованую сталь этой марки.

Изготовление цельнолитых заготовок из стали 15Х12Н2МВФАБ (ЭП 517) взамен сварной конструкции из нескольких цельнокатаных колец позволило сократить цикл изготовления, снизить трудоемкость, а также повысить эксплуатационную надежность изделия в результате исключения применения сварных соединений. Следует отметить, что длительная прочность в этом случае превышает требования технических условий на кованый металл в 1,7 раза.

С целью определения экономической эффективности на примере применения литых колец из отливок ЦЭШЛ взамен поковок на одном из машиностроительных предприятий Украины выполнили соответствующий экономический расчет (использован уровень цен 2008 г.). Суммарные статьи расходов по действующему деформационному технологическому процессу (сырье и материалы, возвратные отходы, трудоемкость, основная и дополнительная зарплата, отчисления на страхования, общепроизводственные расходы цехов) на изготовление одного комплекта (шесть деталей) составляют 10451 грн. При альтернативном варианте (из отливки ЦЭШЛ) аналогичные расходы равняются 10194 грн. Согласно годовой программе выпуска (116 комплектов, 50 т металла) экономия только для газового двигателя модели ДГ 90 достигает 29788 грн.

Рис. 3. Крупногабаритные фасонные отливки ЦЭШЛ массой 0,6 т из стали 15Х12Н2МВФАБ (ЭП 517)

Капиталовложения по инвестиционному проекту «Создание участка электрошлаковых технологий» на данном машиностроительном предприятии составляют 14,2 млн грн, а период окупаемости при планируемом годовом объеме производства 350 т — 9,5 мес.

Использование литого электрошлакового металла, вместо кованого, позволит предприятию решить ряд задач: сократить количество материалов, закупаемых у поставщиков; уменьшить сырьевую зависимость от поставщиков и контрагентов; получить качественные литые детали простой и сложной конфигурации; снизить себестоимость продукции пред-

Таблица 3. Механические свойства стали 15Х12Н2МВФАБ (ЭП 517) в отливке ЦЭШЛ массой 0,6 т

Металл	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5, %	ψ, %	KCU, Дж/см^2	Длительная прочность при T = 550 °С, ч
Отливка ЦЭШЛ	1095…1119 / 1104,66	891…953 / 916,33	12,2…12,4 / 12,3	45,4…45,9 / 46,63	53,2…55,2 / 53,96	170
Требования ТУУ 27.1-0019414-030–2004 на поковки (не менее)	1050	800	10	45	50	100

Примечание. Наплавление вырезки — тангенциальное в обоих случаях.

приятия за счет замены покупных деформированных материалов литыми собственного изготовления.

Выводы

1. Установлено, что крупногабаритные заготовки ЦЭШЛ из жаропрочных сталей отличаются механическими свойствами, превышающими таковые в требованиях технических условий на кованый металл открытой выплавки, и могут применяться вместо жаропрочных кованых, ковано-сварных конструкций как более простые в изготовлении и надежные в эксплуатации.

2. Определено, что высокая пластичность и ударная вязкость литой электрошлаковой стали, обусловленная технологическими особенностями ЦЭШЛ, позволяет увеличить объем упрочняющей дисперсной фазы и достичь большего уровня жаропрочности путем применения сталей с более значительной степенью легирования.

3. Показано, что высокое значение изотропности литой электрошлаковой стали является важной характеристикой металла, способствующей повышению эксплуатационной надежности и длительности функционирования в условиях объемной нагрузки и высокой температуры.

1. *Энергетическое* газотурбостроение: современное состояние и тенденция развития / Б. Е. Патон, А. А. Халатов, Д. А. Костенко и др. — Киев: Ин-т технич. теплофизики, 2008. — 74 с.
2. *Технология* электрошлаковой сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 786 с.
3. *Гривняк И.* Свариваемость сталей / Пер. со словац. Л. С. Гончаренко. — М.: Машиностроение, 1984. — 216 с.
4. *Гудремон Э.* Специальные стали. Т. 1. — М.: Металлургия, 1966. — 736 с.
5. *Справочник* по сварке. Т. 4 / Под ред. А. И. Акулова. — М.: Машиностроение, 1971. — 416 с.
6. *Медовар Б. И.* Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов. — М: Машиностроение, 1966. — 328 с.
7. *Медовар Б. И., Маринский Г. С., Шевцов В. Л.* Центробежное электрошлаковое литье. — Киев: О-во «Знание», 1983. — 48 с.

НПФ «Титан», Киев

Поступила 26.02.2009

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 669.187.2:621.365.91:537.533

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТИТАНА В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ УКРАИНЫ

Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин

Рассмотрены перспективы использования титановых сплавов в качестве конструкционных материалов для атомного машиностроения. Показано, что их применение позволит увеличить срок службы теплообменных аппаратов и корпуса реактора до проектного срока эксплуатации перспективных АЭС нового поколения. Подтверждено высокое качество полуфабрикатов титановых сплавов, полученных в Украине с использованием технологии электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью.

Prospects of application of titanium alloys as structural materials for the nuclear power engineering are considered, It is shown that their application will allow increasing the service life of heat exchangers and reactor bodies up to designed service life of challenging nuclear power stations of the new generation. The high quality of semi-products of titanium alloys, produced in Ukraine with use of technology of electron beam cold hearth melting was confirmed.

Ключевые слова: *титановые сплавы; электронно-лучевая плавка; теплообменник*

Прогресс современной техники в значительной степени зависит от применения конструкционных материалов с более высокими значениями эксплуатационных свойств. К таким металлическим материалам относятся титан и сплавы на его основе. Благодаря высокому уровню удельной прочности, коррозионной стойкости в большинстве агрессивных сред (сопоставимой с коррозионной стойкостью такого металла, как платина) и ряда других уникальных свойств, титановые сплавы нашли широкое применение в аэрокосмической технике, судостроении, химическом машиностроении и энергетике, в том числе атомной.

Критическим элементом атомных энергетических установок, работоспособность которого ограничивает срок службы всей установки, является трубная арматура теплообменных аппаратов. Традиционно применяемые в Украине медные, медно-никелевые и коррозионно-стойкие стали аустенитного класса из-за эксплуатации в условиях высокой температуры и агрессивной среды не обеспечивают необходимого ресурса работоспособности, требуют частого ремонта и замены.

Важной проблемой энергетики Украины является повышение надежности и безопасности эксплуатации теплообменного оборудования (парогенераторов, конденсаторов и др.) путем обеспечения высокой коррозийной стойкости трубных систем в средах с повышенным содержанием солей и абразивными взвесями. Сорокалетний зарубежный опыт свидетельствует, что эту задачу можно успешно решить при помощи теплообменной аппаратуры для атомных и других энергетических установок, изготовленной из титановых сплавов, гарантирующих их высокий рабочий ресурс [1].

В Украине имеются значительные запасы титановых руд наивысшего качества, добываемых и обогащаемых на Иршанском и Вольногорском горно-обогатительных комбинатах, а из полученного концентрата на КП «Запорожский титано-магниевый комбинат» производят до 9000 т в год металлического губчатого титана. За последние 15 лет в Украине на базе технологии электронно-лучевой плавки создано промышленное производство слитков титана и его сплавов, из которых на металлургических предприятиях освоено производство титановых полуфабрикатов различного сортамента (отливки, поковки, прутки, трубы и др.). Таким образом, титановая отрасль Украины позволяет производить весь спектр титановой продукции — от руды до полуфабрикатов и конечных изделий.

Разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины технология электронно-лучевой плавки титана и сплавов на его основе с применением промежуточной емкости (ЭЛПЕ) в качестве исходной шихты позволяет использовать как нескомпактированный губчатый титан (рис. 1, *а*), так и прессованные брикеты из губчатого титана (рис. 1, *б*). Технология имеет ряд существенных преимуществ, по сравнению с традиционной вакуумно-дугового переплава [2].

Технология ЭЛПЕ обеспечивает гарантированное удаление тугоплавких включений высокой и

© Б. Е. ПАТОН, Н. П. ТРИГУБ, С. В. АХОНИН, 2009

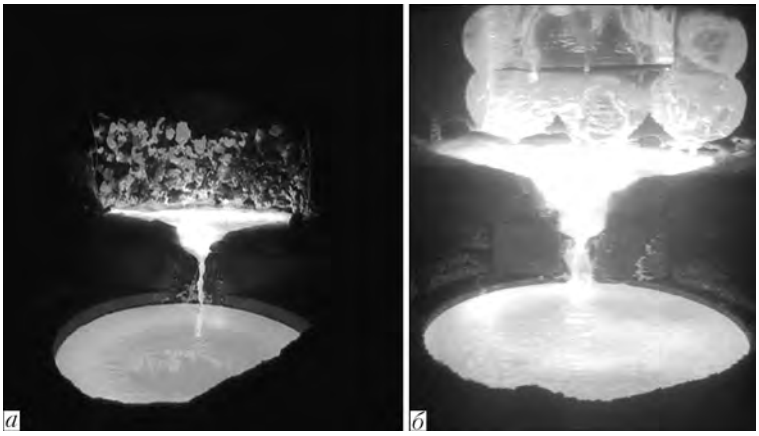


Рис. 1. Процесс плавки губчатого титана в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью: *а* — нескомпактированная шихта; *б* — прессованные брикеты

низкой плотности. Плавку осуществляют в вакууме 0,10…0,01 Па, что практически исключает дополнительное загрязнение титана газовыми примесями. Технология ЭЛПЕ позволяет выплавлять слитки как круглого, так и квадратного сечений, а также слитки-слябы, обеспечить не только хорошую очистку от вредных примесей и неметаллических включений, но и значительное улучшение структуры слитка, а кроме того, — повышение коррозионной стойкости металла [3] (табл. 1).

Следует отметить, что повышение качества титановых слитков (исходного звена для производства полуфабрикатов), одновременно со снижением их стоимости, является важнейшей задачей, определяющей дальнейшее успешное применение титана в промышленности, в частности, в атомном машиностроении.

Для оценки качества труб, произведенных из титановых слитков, полученных способом ЭЛПЕ, на трубных предприятиях Украины проведены комплексные работы по производству опытных партий труб различного сортамента (рис. 2). Из титановых слитков диаметрами от 300 до 600 мм способом горячей деформации изготовили передельные трубы диаметром 90…140 мм [4].

С целью снижения себестоимости труб и повышения выхода годного металла путем исключения операций ковки и последующей механической обдирки поковки непосредственно из литого слитка диаметром 110…200 мм способами горячей прокатки или прессования изготовили трубы диаметрами соответственно 108 и 89 мм и толщиной стенки 15 и 11 мм [4, 5].

Определение уровня прочностных и пластичных характеристик металла различных партий титановых труб показало, что механические свойства труб полностью отвечают требованиям стандартов (табл. 2). При этом различий в значениях механических свойств холоднокатаных труб, изготовленных из деформированного металла или литой заготовки, не обнаружено.

С целью опытно-промышленной проверки возможности использования труб из титановых сплавов для изготовления теплообменников АЭС из полученных на производственных мощностях ГП «НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона» слитков трубных титановых сплавов Grade 12 (рис. 3) и ПТ-7М изготовили партию холоднокатаных труб диаметром 16 мм и толщиной стенки 0,5 мм. Анализ результатов испытаний механических свойств труб из сплава ПТ-7М (табл. 3) показал, что они полностью соответствуют требованиям ГОСТ 22897–86.

Таблица 1. Скорость коррозии $i_к$ сплава ВТ1-0 до и после ЭЛПЕ

Условия испытаний	$i_к$, мм/год	
	ВДП	ЭЛПЕ
10 % H_2SO_4, 25 °С, выдержка 336 ч	0,3591 / 0,4101	0,2814 / 0,2998
10 % HCl, 25 °С, выдержка 336 ч	0,2844 / 0,3202	0,1800 / 0,1818
0,9 % H_2SO_4, 50 °С, выдержка 100 ч	0,0033 / 0,0036	0,0013 / 0,0013
Морская вода, 40 °С, выдержка 1000 ч, без нагрузки	0,0005	0,0001
Морская вода, 40 °С, выдержка 1000 ч, нагрузка 0,9 $\sigma_{0,2}$	0,0006	0,0003
Морская атмосфера, 35 °С, выдержка 1000 ч, без нагрузки	0,0008	0,0002
Морская атмосфера, 35 °С, выдержка 1000 ч, нагрузка 0,9 $\sigma_{0,2}$	0,0008	0,0003

Примечание. В числителе дана минимальная, знаменателе — максимальная скорость коррозии.

Рис. 2. Трубы горячекатаные из титана ВТ1-0 и холоднодеформированные из титанового сплава ПТ-7М различного сортамента

Таблица 2. Механические свойства труб из титана марки ВТ1-0, полученного способом ЭЛПЕ

Марка сплава	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	ψ, %	$a_н$, Дж/м^2
Горячекатаные диаметром 108 мм и толщиной стенки 15 мм					
ВТ1-0	445…475	385…410	26…34	64…75	22…25
ГОСТ 21945–76	343…568	>245	>20	>42	Не нормируется
Холоднокатаные диаметром 38 и толщиной стенки 2 мм					
ВТ1-0	450…550	310…420	30…40	56…64	20…25
ГОСТ 22897–86	343…568	>216	>24	Не нормируется	Не нормируется

Для дальнейшего снижения себестоимости и трудоемкости изготовления слитков титана по первичному сырью (губки в виде крицы), а также повышения качества титановых слитков в ИЭС им. Е. О. Патона разработана технология переплава недробленых блоков губчатого титана в специализированной электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью (рис. 4), позволяющая уменьшить себестоимость титановых слитков на 10 % [6].

Значительного удешевления титановых труб можно достичь при использовании сварных труб вместо цельнотянутых. Для производства заготовки под прокатку титанового штрипса в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработана технология выплавки в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью слитков-слябов (рис. 5).

Использование слитков-слябов позволяет исключить из технологической цепочки получения титанового проката капиталоемкую и энергозатратную операцию перековывания цилиндрических слитков на слябы. Механические свойства горячекатаного листа целиком отвечают требованиям стандартов (табл. 4). Использование слитков-слябов вместо цилиндрического слитка дало возможность увеличить выход годного металла на 10% и снизить себестоимость титановых листов на 20%.

В промышленных масштабах производство титановых труб нужного сортамента для теплообменного оборудования, а также морских платформ по добыче нефти и газа и других отраслей промышленности может быть организовано на ГП «Днепропетровский завод прецизионных труб» из литых трубных заготовок, изготовленных в ГП «Научно-производственный центр «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины».

Таблица 3. Механические свойства холоднокатаных труб диаметром 16 мм и толщиной стенки 0,5 мм из титанового сплава ПТ-7М, полученного способом ЭЛПЕ

Марка сплава	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %
ПТ-7М	580…660	270…360	26…32
ГОСТ 22897–86	470…666	<372	>20

В ИЭС им. Е. О. Патона выполнили комплекс исследований по созданию новых хорошо свариваемых титановых сплавов, значения характеристик которых превышают таковые существующих титановых сплавов, а также промышленной технологии изготовления этих сплавов.

На основании данных исследований разработали среднелегированный титановый сплав СП15 (Ti–4Al–2,5Mo–3,5Nb–2,5V–1,5Zr), который по уровню механических и коррозионных свойств (табл. 5), а также свариваемости превосходит широко известный титановый сплав ВТ6 (Ti–6Al–4V). Кроме того, в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины создан новый высокопрочный (α+β)-сплав Т-110 (Ti–5Al–1Mo–1V–5Nb–1Fe–0,3Zr), полуфабрикаты из которого имеют прочность свыше 100 МПа при пластичности более 11 %.

Механические характеристики титанового сплава Т-110 после различных режимов термического упрочнения (толщина 5…25 мм) следующие: $\sigma_в$ = = 1100…1450 МПа; $\sigma_т$ = 1050…1370 МПа; δ= 10…18 %; γ = 30…58 %; $a_н$=17…30 Дж/м^2.

Одно из основных направлений технического развития атомной энергетики — создание энергоб-

Рис. 3. Внешний вид слитка титанового сплава Grade 12 диаметром 600 мм

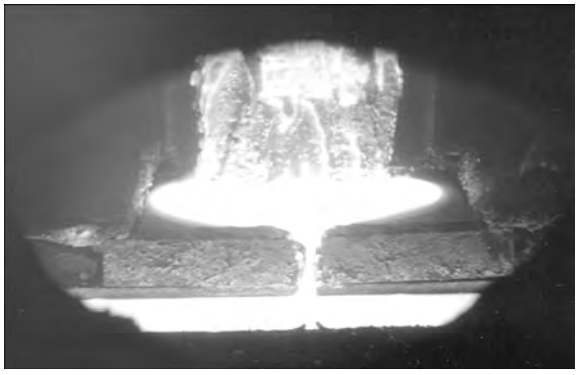


Рис. 4. Процесс электронно-лучевой плавки недробленого блока губчатого титана

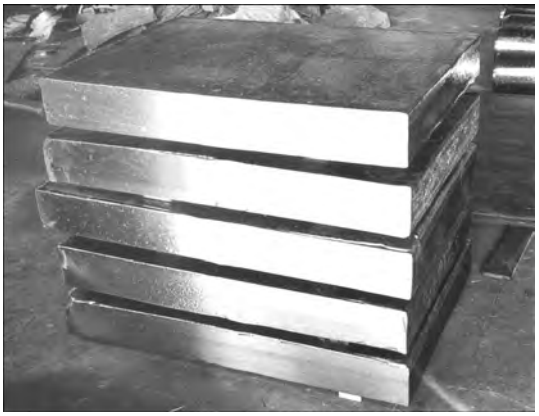


Рис. 5. Слябы размерами 160×950×1800 мм из титанового сплава ВТ1-0, полученные способом ЭЛПЕ

Таблица 4. Средние значения механических характеристик горячекатаного листа толщиной 6 мм, полученного из слябов ЭЛПЕ

Марка сплава	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	γ, %
ВТ1-0	415…475	340…385	24…40	58…65
ГОСТ 22178–76	375…540	Не определяли	>20,0	Не определяли
ПТ-3В	770…820	710…730	12…14	29…36
ГОСТ 23755–79	<882	Не определяли	>10,0	Не определяли

Таблица 5. Коррозионная стойкость титанового сплава системы Ti–Al–Mo–Nb–V–Zr

Марка сплава	$i_к$ (выдержка 500 ч при 20 °С), мм/год, в растворе кислоты (%)			
	соляной		серной	
	5	10	5	10
ВТ1-0	0,0050	0,1020	0,0045	0,0091
Ti–4Al–2,5Mo–3,5Nb–2,5V–1,5Zr	0,0002	0,0083	0,0002	0,0005

локов водо-водяных реакторов повышенной мощности (типа ВВЭР-1500), а также увеличенных ресурса и срока эксплуатации (до 60 лет и более). Особо важным при решении этой задачи является увеличение ресурса работы корпуса реактора, который в процессе эксплуатации подвергается активному нейтронному облучению.

Применяемые в настоящее время корпусные реакторные стали склонны к хладноломкости, непрерывно возрастающей в процессе эксплуатации вследствие облучения, что приводит к повышению вероятности хрупкого разрушения в области положительных температур (>20 °С) [7].

Проведенные в ЦНИИ КМ «Прометей» исследовательские работы показали, что титан и сплавы на его основе характеризуются более высокой радиационной стойкостью, чем существующие корпусные реакторные стали, что позволяет увеличить срок безопасной эксплуатации корпуса реактора до 60 лет и более. При этом титан имеет уникально низкую склонность к радиационной активируемости и отличается быстрым спадом наведенной радиоактивности, что в будущем позволит ускорить и удешевить процесс вывода реактора из эксплуатации. Кроме того, высокий уровень коррозионной стойкости титана даст возможность упростить конструкцию корпуса реактора [8, 9].

Выводы

1. Показано, что титан и сплавы на его основе являются перспективными конструкционными материалами для атомного машиностроения, применение которых позволит увеличить срок службы теплообменных аппаратов и корпуса реактора до проектного срока эксплуатации перспективных АЭС нового поколения.

2. В Украине создан полный металлургический цикл производства титана; выплавка слитков базируется на прогрессивной технологии ЭЛПЕ.

3. В ИЭС им. Е. О. Патона разработаны отечественные титановые сплавы, отличающиеся повышенными механическими и физическими характеристиками при хорошей свариваемости.

4. В Украине разработана технология и налажено производство труб в широком диапазоне размеров. Механические свойства поковок, листа, прутков и труб, изготовленных из титановых слитков, полученных способом ЭЛПЕ, отвечают требованиям отечественных и зарубежных стандартов.

1. *Александров А. В., Прудковский Б. А.* Разные грани титана и его сплавов // Титан. — 2005. — № 1. — С. 64–70.
2. *Электронно-лучевая* плавка титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. — Киев: Наук. думка, 2006. — 248 с.
3. *Электронно-лучевая* плавка / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин, С. В. Ахонин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 265 с.
4. *Калинюк А. Н., Козловец О. Н., Ахонин С. В.* Производство полуфабрикатов из титановых сплавов, полученных методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2002. — № 2. — С. 25–28.
5. *Исследование* процесса изготовления горячекатаных и холоднодеформированных труб из литой недеформированной трубной заготовки титанового сплава ВТ1-0, полученной электронно-лучевой плавкой / Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, А. А. Чепинский и др. // Современ. электрометаллургия. — 2006. — № 2. — С. 25–28.
6. *Электронно-лучевая* плавка недробленых блоков губчатого титана / Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук и др. // Там же. — 2006. — № 4. — С. 6–9.
7. *Рыбин В. В., Ушков С. С., Кожевников О. А.* Роль титановых сплавов на новом этапе развития атомной энергетики // Титан-2008 в СНГ: Тр. междунар. конф. (Санкт-Петербург, 18–21 мая 2008 г.). — СПб., 2008. — С. 11–24.
8. *Сплавы* на основе титана как перспективные материалы для ЯЭУ / О. А. Кожевников, В. В. Рыбин, С. С. Ушков, Г. П. Карзов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы. — 2004. — Вып. 1. — С. 176–182.
9. *Рыбин В. В., Ушков С. С., Кожевников О. А.* Сплавы на основе титана — перспективные материалы для атомной энергетики // Вопросы материаловедения. — 2006. — № 1. — С. 159–168.

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

Поступила 08.04.2009

УДК 669.187.826

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ МНОГОСЛОЙНОЙ ФОЛЬГИ Al/Cu, ПОЛУЧЕННОЙ СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ

Л. А. Олиховская, Т. В. Мельниченко, Я. И. Матвиенко, А. И. Устинов

Методами рентгеновской дифракции и сканирующей электронной микроскопии исследованы фазовые превращения в твердом состоянии при нагреве многослойной фольги, состоящей из чередующихся слоев алюминия и меди (с периодом 0,7 мкм), соответствующей составу $Al_{84}Cu_{16}$. Показано, что при нагреве до 90 °С в фольге образуется интерметаллид AlCu, а при температуре до 150 °С — Al_2Cu. Нагрев выше 350 °С вызывает постепенный рост объемной доли фазы Al_2Cu при уменьшении объемной доли фазы AlCu. В результате таких превращений в фольге формируется двухфазное состояние (Al + $CuAl_2$), соответствующее равновесной диаграмме состояния.

Using methods of X-ray diffraction and scanning electron microscopy the phase transformations in solid state in heating a multi-layer foil, consisting of alternate layers of aluminium and copper (at 0.7 m period) and corresponding to the composition $Al_{84}Cu_{16}$, were investigated. It is shown that intermetallic AlCu is formed in foil at heating up to 90 °C and Al_2Cu is formed at up to 150 °C. The heating above 350 °C causes a gradual growth of a volumetric fraction of phase AlCu at decrease of volumetric fraction of phase AlCu. These transformations in foil results in the formation of two-phase state (Al + CuA_{l2}) corresponding to an equilibrium state diagram.

Ключевые слова: *электронно-лучевое осаждение; многослойная фольга; фазовое превращение*

Введение. Слоистые материалы, состоящие из чередующихся слоев на основе интерметаллидообразующих компонент, находят применение в качестве исходных материалов для изготовления тонких интерметаллических фольг, локальных источников нагрева и прослоек при сварке давлением [1–4].

В ряде случаев для применения слоистых систем требуются сравнительно низкие значения температуры инициации реакционных процессов. В отличие от многослойных фольг Al/Ni и Al/Ti, в которых образование первых интерметаллических фаз обнаруживалось при температурах примерно 250…350 °С [5, 6], в слоистых системах Al/Cu начало реакций с образованием интерметаллида зафиксировано при температурах около 150 °С [7, 8]. С учетом этой особенности предположили, что многослойные системы Al/Cu могут использоваться в качестве прослоек при соединении алюминия и меди, а также их сплавов способом диффузионной сварки.

Литературных данных о процессах реакционной диффузии и фазообразовании в системе Al/Cu, в отличие от других слоистых систем, имеется немного. Причем большая часть из них касается массивных образцов, соединение которых реализовывается с применением трения [9–13]. Исследования планарных систем Al/Cu после диффузионной сварки выполнялись для структур, составленных всего из нескольких слоев. Эти структуры получали путем прокатки пакетов из фольг алюминия и меди [14–16], а также способами осаждения [7, 17–21]. Многослойные системы, включающие десятки и более слоев, не исследовали.

Способы электронно-лучевого испарения и осаждения в вакууме позволяют получать многослойные системы, толщина слоев в которых может варьироваться от субмикронных до микронных размеров. При этом средний размер зерен в слоях равняется примерно толщине слоя, а границы между соседними слоями имеют относительно совершенную структуру.

Эти структурные факторы, а также высокая концентрация дефектов вакансионного типа в объеме и на границах зерен могут существенно влиять на температуру инициации, путь и кинетику реакций, а следовательно, и на процесс, и на морфологию образования фаз. Таким образом, в работе исследованы фазовые превращения при нагреве многослойных фольг Al/Cu, полученных способом электронно-лучевого осаждения. Исследовали фольги, соотношение компонент в которых приближалось к эвтектическому составу с минимальной температурой плавления, поскольку предполагали, что такой сос-

© Л. А. ОЛИХОВСКАЯ, Т. В. МЕЛЬНИЧЕНКО, Я. И. МАТВИЕНКО, А. И. УСТИНОВ, 2009

тав сможет обеспечить минимальную температуру начала реакций.

Способы получения и исследования. Многослойные фольги Al/Cu получали способом последовательного осаждения паровых потоков алюминия и меди в установке, детально описанной в работе [22]. Два слитка меди и алюминия, помещенные в отдельные изложницы и находящиеся в частях вакуумной камеры, разделенных непроницаемым экраном, испарялись с помощью электронно-лучевых пушек. Паровые потоки осаждались на непрерывно вращающуюся над экраном подложку из нержавеющей стали.

Вращение подложки и наличие экрана обеспечивало последовательное осаждение паров меди и алюминия на подложку. Для того, чтобы впоследствии отделять фольгу Al/Cu от подложки, на нее предварительно осаждали антиадгезионный слой NaCl. Давление остаточных газов в камере при осаждении составляло около 5×10^{-3} Па; температуру подложки поддерживали не выше 120 °С; режимы испарения обеспечивали скорость осаждения 50 нм/с.

Многослойные конденсаты, соотношение компонент в которых 84Al–16Cu (ат. %) было близким к химическому составу эвтектики с минимальной температурой плавления (рис. 1), имели период слоев (сумма толщин одного слоя алюминия и одного слоя меди) 0,7 мкм.

Изохронный (в интервале температур 50…600 °С в течение 30 мин) и изотермический (в течение 15 ч при 90 °С) отжиг образцов фольги осуществляли в вакуумной печи при давлении примерно 10^{-1} Па. После таких способов термообработки образцы исследовали методом сканирующей электронной микроскопии и рентгенодифракционного анализа. Для выявления структуры образцов использовали методы селективного химического травления в реактиве «Kroll's». Структуру поперечного сечения фольги анализировали с помощью сканирующей приставки к просвечивающему электронному микроскопу «Hitachi H-800» при ускоряющем напряжении 150…200 кВ.

Рентгенодифракционные измерения проводили в стандартной геометрии θ-2θ на дифрактометре «Дрон-4» в излучении Cu_{K_α} Образцы для рентгеновских исследований представляли собой кусочки фольги.

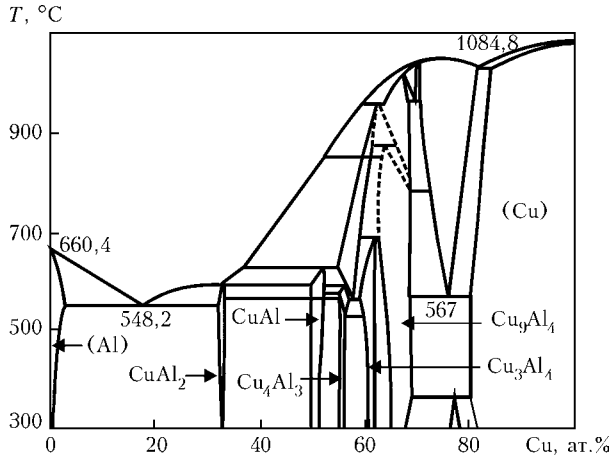


Рис. 1. Равновесная диаграмма состояний системы Cu–Al [23]

Экспериментальные результаты. На рис. 2 показаны дифрактограммы образцов фольги в исходном состоянии, а также отожженных при разных температурах в течение 30 мин. На дифрактограмме образца фольги после осаждения (рис. 2, *а*) обнаружены только пики, свойственные алюминию и меди. Соотношение интегральной интенсивности пиков, измеренное из рентгенодифракционной картины, указывает на текстурированное состояние слоев алюминия и меди. Так, соотношение между интенсивностями пиков (200) и (111) для поликристаллического образца алюминия в отсутствие текстуры должно быть приблизительно равным 0,45; для образца меди — 0,43. В исследованных образцах эти соотношения составили 0,13 и 0,16 соответственно для алюминия и меди.

До температуры 90 °С на дифрактограммах не зафиксировано каких-либо изменений, по сравнению с представленной на рис. 2, *а*. Нагрев образца фольги до 90 °С вызвал формирование пика, расположенного между пиками (111) меди и (200) алюминия (рис. 2, *б*), идентифицированного как пик (020) соединения CuAl. При увеличении температуры отжига до 120 °С интенсивность образовавшегося пика возросла, также сформировались пики (312) и (220), свойственные данной фазе (рис. 2, *в*). При этом заметно уменьшилась интенсивность пиков меди. Анализ соотношения интегральных интенсивностей пиков AlCu, меди и алюминия на диф-

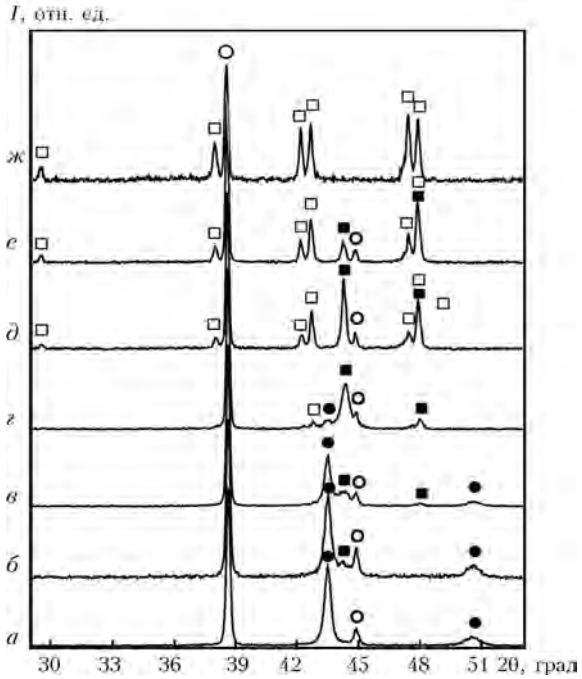


Рис. 2. Рентгендифракционные картины от образцов многослойной фольги Cu/Al после осаждения (*а*) и отжига в течение 30 мин при температурах 90 (*б*), 120 (*в*), 150 (*г*), 200 (*д*), 250 (*е*), 400 (*ж*), °С; значками ○, ●, ■ и ❑ обозначены пики соответственно от Al, Cu, AlCu и Al_2Cu; *I* — интенсивность

рактограммах показал, что объемная доля фазы AlCu увеличивается от примерно 26 при температуре 90 °С до 35 мас. % при 120 °С.

На дифрактограмме образца, отожженного при 150 °С, кроме указанных пиков, сформировалась система пиков, идентифицированная как свойственная фазе Al_2Cu (рис. 2, *г*). Возрастание интенсивности пиков фазы Al_2Cu обнаружено при повышении температуры отжига до 200 °С (рис. 2, *д*); при этом интенсивность пиков фазы AlCu уменьшилась, а пики меди практически исчезли. Перераспределение интенсивностей между пиками фаз AlCu и Al_2Cu в пользу последней продолжалось при повышении температуры отжига до 250 °С (рис. 2, *е*) и выше. Этот процесс завершился при нагреве образцов до значений температуры около 400 °С, в результате чего на дифрактограмме зафиксированы пики алюминия и фазы Al_2Cu (рис. 2, *ж*). С последующим повышением температуры вплоть до 600 °С дифракционная картина не изменялась.

Электронно-микроскопические изображения поперечного сечения фольги (рис. 3) иллюстрируют изменение структуры образцов при нагреве до разных значений температуры в течение 30 мин. Избирательное травление позволяет (исходя из фазового контраста на микроструктуре) сделать вывод о структурном состоянии образца. Показано, что фольга после осаждения состоит из непрерывных слоев меди (светлые) и алюминия (темные — рис. 3, *а*). Наличие в слоях алюминия участков с фазовым контрастом, отличным от меди и алюминия, следует рассматривать как результат перемешивания атомов между слоями.

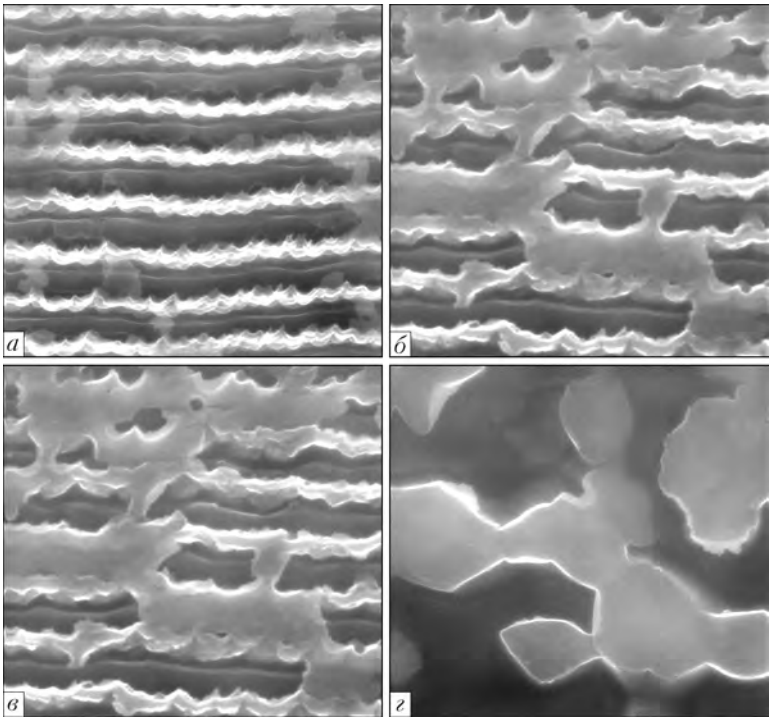


Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения поперечного сечения фольги Cu/Al после осаждения (*а*) и отжига в течение 30 мин при температурах 120 (*б*), 200 (*в*) и 500 (*г*) °С; × 20000

Нагрев образца до температуры 120 °С способствует увеличению объемной доли фазы, обогащенной медью (светло-серый фазовый контраст, отличающийся от слоев меди и алюминия — рис. 3, *б*). Эта фаза, по-видимому, формируется в результате взаимной диффузии компонентов слоев в наиболее дефектных участках границ между слоями. При этом значения толщины непрореагировавших слоев меди и алюминия заметно не меняются. Поскольку рентгенодифракционные исследования образца, отожженного при 120 °С, показали присутствие фазы AlCu в дополнение к алюминию и меди, области светло-серого контраста на микроструктурах могут быть соотнесены именно с фазой AlCu.

Отжиг фольги при температуре 200 °С приводит к изменению толщины слоев (рис. 3, *в*). Толщина слоев, обогащенных медью, существенно увеличивается. При этом диффузионные процессы интенсифицируются во всем объеме фольги, что, судя по фазовому контрасту, приводит к формированию, по крайней мере, трех фазовых составляющих. Эти результаты коррелируют с данными дифракционного исследования, показавшими начало формирования фазы Al_2Cu при 150 °С и рост ее объемной доли при повышении температуры, сопровождающийся уменьшением объемной доли фазы AlCu.

При дальнейшем возрастании температуры отжига до 500 °С слоистая структура фольги исчезает (рис. 3, *г*), формируется аномальная эвтектика (частицы интерметаллида, которым, согласно дифракционным данным, должна быть фаза Al_2Cu, расположены в матрице алюминия).

Влияние продолжительности нагрева на структуру фольги исследовали на образцах, отожженых при температуре 90 °С, при которой отжиг фольги в течение 30 мин способствовал образованию первой интерметаллической фазы AlCu. Анализ микроструктуры образцов показал, что длительный отжиг приводит к формированию большой объемной доли фазы, обогащенной медью, зародыши которой присутствуют в образцах после осаждения, о чем свидетельствует фазовый контраст на микроструктуре (рис. 4). Как видно из дифракционных картин

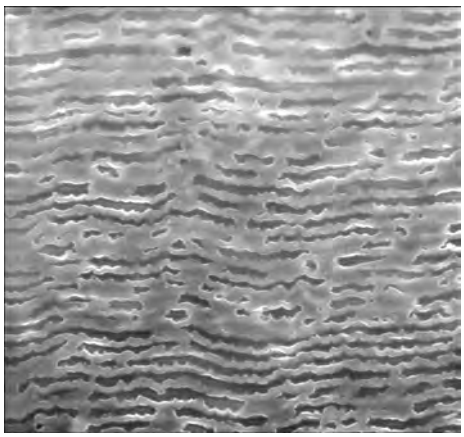


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение поперечного сечения образца фольги Al/Cu, отожженного при температуре 90 °С в течение 16 ч; × 5000

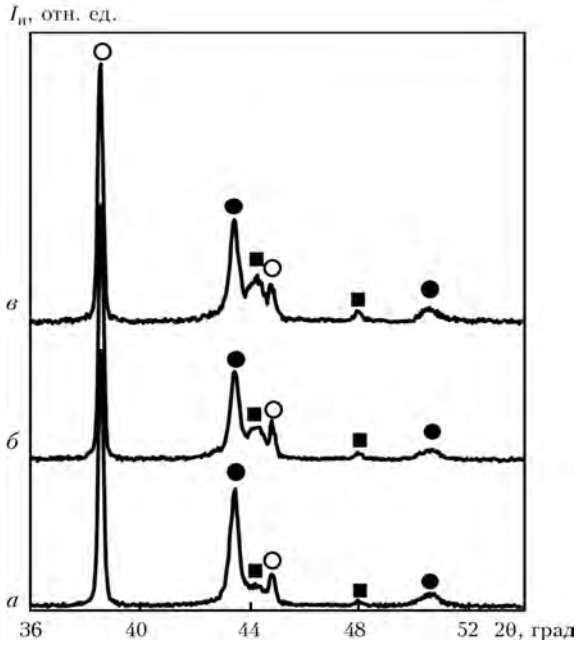


Рис. 5. Рентгендифракционные картины от образцов многослойной фольги Cu/Al, отожженных при температуре 90 °С в течение 0,5 (*а*), 4,0 (*б*) и 16,0 (*в*) ч; значками ○, ● и ■ обозначены пики соответственно от Al, Cu и фазы AlCu: $I_н$ — нормированная интенсивность

(рис. 5), при увеличении времени отжига происходит рост интенсивности пиков, относящихся к фазе AlCu. Пиков, полученных от других фаз, кроме AlCu, не зафиксировано при отжиге вплоть до 16 ч. Из анализа соотношения интегральных интенсивностей пиков на дифрактограммах установлено, что объемная доля фазы AlCu выросла от 25 (отжиг 30 мин) до значения около 55 мас. % при отжиге 16 ч.

Обсуждение результатов. Таким образом, при нагреве многослойной фольги Al/Cu, соотношение компонент в которой соответствует составу $Al_{84}Cu_{16}$, зафиксировано последовательное формирование фаз AlCu и Al_2Cu. Превращение, вызывающее образование первой фазы AlCu в количестве, достаточном для идентификации рентгенодифракционным методом, обнаружено при температуре приблизительно 90 °С, т. е. в исследованной фольге реакции между слоями начинаются при значениях температуры более низких, чем температура осаждения (около 120 °С).

Поэтому вполне закономерным является наличие признаков перемешивания, выявленных на микроструктурах образцов фольги после осаждения. С повышением температуры вслед за фазой AlCu образуется фаза Al_2Cu, и обе они сосуществуют в некотором интервале температур.

По мере дальнейшего роста температуры, после израсходования в образце всей доступной меди, объемная доля фазы Al_2Cu увеличивается при уменьшении объемной доли фазы AlCu, вплоть до ее исчезновения, а фазовый состав образцов фольги при температуре примерно 400 °С и выше соответствует эвтектике Al + Al_2Cu.

Такая последовательность превращений отличается от результатов, полученных нами ранее при нагреве многослойных конденсатов Al/Ni и Al/Ti [5, 6], в которых при повышении температуры формировались интерметаллиды, более обогащенные никелем либо титаном.

Полученные в работе результаты относительно очередности образования фаз в многослойной системе Al/Cu отличаются от данных других авторов. Так, в большинстве работ, посвященных изучению ламинатной композиции Al/Cu, состоящей из двух или более слоев [7, 16–19] разного химического состава, обнаружено формирование в качестве первой фазы Al_2Cu, а при дальнейшем увеличении температуры или продолжительности термообработки — фаз, обогащенных медью из AlCu и Al_4Cu_9.

Поскольку превращения в ламинатной системе контролируются диффузией, то диффузионная кинетика является одним из важных факторов, определяющих процесс образования фаз [24–27]. Кинетические характеристики зависят от структурного состояния объекта (характеристик поверхности раздела между слоями, размера зерен в слоях, структуры межзеренных границ, типа и концентрации дефектов). В связи с этим следует подчеркнуть, что использованный в данной работе способ получения фольг является высокоэнергетичным. Это позволяет достигать скорости осаждения примерно 50 нм/с, что на порядок превышает те, при которых получались слоистые структуры другими исследователями [18, 19].

При осаждении с высокой скоростью материал формируется в существенно неравновесных условиях, что может вызывать формирование высокой концентрации дефектов вакансионного типа в объеме и на границе слоев. Кроме того, при низких температурах осаждения (<0,3 $T_{пл}$) образуется столбчатая структура, о чем свидетельствует текстурированное состояние слоев как алюминия, так и меди. Границы между кристаллитами в такой столбчатой структуре являются дефектными и могут быть основными каналами диффузионных потоков атомов [28].

Выводы

1. Показано, что фазовые и структурные превращения в многослойной фольге Al/Cu при ее медленном нагреве определяются последовательностью формирования фаз, начинающегося образованием обогащенного медью интерметаллида AlCu и продолжающегося его обеднением в направлении образования интерметаллида Al_2Cu с последующим формированием структурного состояния, соответствующего химическому составу фольги. Последовательность превращений не зависит от условий нагрева фольги.

2. Установлено, что процесс фазовых превращений и характер формирования структуры определяются интенсификацией диффузии меди и алюминия в местах скопления структурных дефектов, обусловленных низкой температурой осаждения.

1. *Nanometric* multilayers: A new approach for joining TiAl / A. S. Ramos, M. T. Vieira, L. I. Duarte et al. // Intermetallics. — 2006. — N 14. — P. 1157–1162.
2. *Cao J., Feng J. C., Li Z. R.* Microstructure and fracture properties of reaction-assisted diffusion bonding of TiAl intermetallic with Al/Ni multilayer foils // J. Alloys and Compounds. — 2008. — № 466. — P. 363–367.
3. *Diffusion* welding of γ-TiAl based alloys through nano-layered foil of Ti/Al system / A. I. Ustinov, Yu. V. Falchenko, A. Yu. et al. // Intermetallics. — 2008. — № 16. — P. 1043–1045.
4. *Pascal C., Marin-Ayral R. M., Te'denac J. C.* Joining of nickel monoaluminide to a superalloy substrate by high pressure self-propagating high-temperature synthesis // J. Alloys and Compounds. — 2002. — № 337. — P. 221–225.
5. *Effect* of overall composition on thermally induced solid-state transformations in thick EB PVD Al/Ni multilayers / A. Ustinov, L. Olikhovskaya, T. Melnichenko, A. Shyshkin // Surf. Coat. Technol. — 2008. — № 202. — P. 3832–3838.
6. *Твердофазные* реакции при нагреве многослойных фольг Al/Ti, полученных методом электронно-лучевого осаждения / А. И. Устинов, Л. А. Олиховская, Т. В. Мельниченко и др. // Автомат. сварка. — 2008. — № 2. — С. 21–28.
7. *Investigation* of diffusion in the Cu–Al thin film system / A. E. Gershinski, B. I. Fomin, E. I. Cherepov, F. L. Edelman // Thin Solid Films. — 1977. — № 42. — P. 269–275.
8. *Silveria V. L. A., Mury A. G.* Analysis of the behavior of bimetallic joints (Al/Cu) // J. Microstruct. Sci. — 1987. — № 14. — P. 277–287.
9. *Lee W.-B., Bang K.-S., Jung S.-B.* Effects of intermetallic compound on the electrical and mechanical properties of friction welded Cu/Al bimetallic joints during annealing // J. Alloys and Compounds. — 2005. — № 390. — P. 212–219.
10. *Ouyang J., Yarrapareddy E., Kovacevic R.* Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper // J. Mater. Process. Technol. — 2006. — № 172. — P. 110–122.
11. *Microstructure* and phase constitution near the interface of Cu/Al vacuum brazing using Al-Si filler metal / C. Xia, Y. Lia, U. A. Puchkov et al. // Vacuum. — 2008. — № 82. — P. 799–804.
12. *Abdollah-Zadeh A., Saeid T., Sazgari B.* Microstructural and mechanical properties of friction stir welded aluminum/copper lap joints // J. Alloys and Compounds. — 2008. — № 460. — P. 535–538.
13. *Ay I., Celik S., Celik I.* Comparison of properties of friction and diffusion welded joints made between the pure aluminium and copper bars // BAU Fen Bilimleri Enstitusu Dergisi. — 1999. — **1**, N 2. — P. 88–102.
14. *Abbasi M., Taherib A. K., Salehia M. T.* Growth rate of intermetallic compounds in Al/Cu bimetal produced by cold roll welding process // J. Alloys and Compounds. — 2001. — № 319. — P. 233–241.
15. *Heness G., Wuhrer R., Yeung W.Y.* Interfacial strength development of roll-bonded aluminium/copper metal laminates // Mater. Sci. Eng. A. — 2007. — № 483–484. — P. 740–743.
16. *Janghorban K.* Investigation of structure and mechanical properties of multi-layered Al/Cu composite produced by accumulative roll bonding (ARB) process / M. Eizadjou, A. K. Talachi, H. D. Manesh et al. // Compos. Sci. Technol. — 2008. — № 68. — P. 2003–2009.
17. *Rajan K., Wallach E. R. A* transmission electron microscopy study of intermetallic formation in aluminium-copper thin film couples // J. Cryst. Growth. — 1980. — № 49. — 297–302.
18. *Hentzell H. T. G., Thomson R. D., Tu K. N.* Interdiffusion in copper-aluminium film bilayers. I. Structure and kinetics of sequentional compound formation // J. Appl. Phys. — 1983. — № 54. — P. 6923–6928.
19. *Hentzell H. T. G., Thomson R. D., Tu K. N.* Interdiffusion in copper-aluminium film bilayers. II. Analysis of marker motin during sequential compound formation // Ibid. — 1983. — № 54. — P. 6923–6928.
20. *Harutyunyan V. S., Torossyan A. R., Aivazyan A. P.* Deformations, subgrain structure, dislocation arrangement and transition later formation in Cu/Al coating deposited by mechanochemical technique // Appl. Surf. Sci. — 2004. — № 222. — P. 43–64.
21. *Solid* state reaction in sandwich type Al/Cu thin films / C.-B. Ene, G. Schmitz, T. Al-Kassab, R. Kirchheim // Ultramicroscopy. — 2007. — № 107. — P. 802–807.
22. *Диффузионная* сварка микродисперсного композита АМг-5 + 27 % Al_2O_3 с применением нанослойной фольги Ni/Al / А. Я. Ищенко, Ю. В. Фальченко, А. И. Устинов и др. // Автомат. сварка. — 2007. — № 7. — С. 5–9.
23. *Binary* alloy phase diagrams / T. B. Massalski, H. Okamoto, P. R. Subramanian, L. Kacprzak. — Ohio: ASM Intern., 1986. — 526 c.
24. *Funamizu Y., Watanabe K.* Interdiffusion In the Aluminum-Copper Systems // Trans. Jap. Inst. Metals. — 1971. — № 12. — P. 147–152.
25. *Tanaka Y., Kajihara M., Watanabe Y.* Growth behavior of compound layers during reactive diffusion between solid Cu and liquid Al // Mater. Sci. Eng. A. — 2007. — № 445–446. — P. 335–363.
26. *Dybcov V. I.* Growth kinetics of chemical compound layers. — Cambridge: Cambridge Int. Sci. Publ., 1998. — 192 p.
27. *Herzig C., Divinski S.* Essentials in diffusion behavior of nickel- and titanium-aluminides // Intermetallics. — 2004. — № 12. — P. 993–1003.
28. *Suzuki A., Mishin Y.* Atomic mechanisms of grain boundary diffusion: Low versus high temperatures // J. Mater. Sci. — 2005. — № 40. — P. 3155–3161.

Ин-т металлофизики им. Г. В. Курдюмова

НАН Украины, Киев

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

Поступила 16.03.2009

УДК 669.187.58.001.4

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ ОТХОДОВ ГУБЧАТОГО ТИТАНА И ИЗДЕЛИЙ ИЗ НЕГО*

В. С. Константинов, В. А. Шаповалов, С. И. Давыдов, Л. Я. Шварцман, С. М. Теслевич

Рассмотрены особенности и технологические схемы проката слитков-слябов, выплавленных в плазменно-дуговой печи из отходов губчатого титана. Показано, что слитки перед прокаткой необходимо нагревать в вакуумной печи для предотвращения насыщения металла газовыми примесями. Отмечена возможность получения отдельных видов изделий из 100 % отходов губчатого титана.

Peculiarities and technological schemes of rolling of ingots-slabs, melted in plasma-arc furnace of spongy titanium wastes, are considered. It is shown that ingots before rolling should be heated in a vacuum furnace to prevent the metal saturation with gas impurities. The possibility of producing the separate types of products of 100 % wastes of spongy titanium is outlined.

Ключевые слова: *слиток; сляб; прокат; лист; плавка; ковка; заготовка; печь; вакуум; губчатый титан*

При производстве губчатого титана образуются отходы различных фракций, включающие повышенное количество газовых примесей, железа, кремния и других элементов [1]. Содержание вредных примесей в различных партиях губчатого титана марки ТГ-ТВ колеблется в широких пределах и зависит от гранулометрического состава, места отбора пробы от блока губчатого титана. Наибольшее количество вредных примесей расположено в донной части и его боковой поверхности.

Рис. 1. Слитки плазменной плавки из 100 % отходов губчатого титана

Неоднородность химического состава и повышенное количество вредных примесей, значительно снижающих пластичность и вязкость металла, предопределили использование отходов в черной металлургии в качестве присадок при выплавке специальных сталей и т. д. С целью более рационального применения такого дорогостоящего металла, как титан, ведутся работы по расширению области его применения [2].

Предпринята попытка изготовления титанового проката из некондиционной титановой губки, а также ряда изделий из него. Титановый лист получали путем прокатывания слитков размерами 210×400×800 мм, выплавленных в двухручьевой плазменно-дуговой печи УП-100, установленной на КП «Запорожский титано-магниевый комбинат» [3] (рис. 1).

Слитки-слябы выплавляли непосредственно из отходов губчатого титана. При этом их подача, расплавление и последующее перемещение в камеру осуществляли в одном кристаллизаторе размерами 215×405×280 мм, а затем в другом тех же размеров.

Перед прокаткой производили замер твердости и определяли химический состав слитков. Прока-

* В работе принимал участие В. П. Макаренко.

© В. С. КОНСТАНТИНОВ, В. А. ШАПОВАЛОВ, С. И. ДАВЫДОВ, Л. Я. ШВАРЦМАН, С. М. ТЕСЛЕВИЧ, 2009

Рис. 2. Общий вид поковки из слитка размерами (50…80) × (700…800) × (800…1000) мм из слитка плазменной плавки

тывали слитки на станах разного типа с использованием различных способов нагрева заготовки перед прокаткой [4].

По одной из схем слиток-сляб размерами 210×400×800 мм проковывали на прессе усилием 60000 кН. В связи с повышенной твердостью слитки-слябы нагревали в печи открытого типа до температуры 1100 °С. В качестве теплоносителя использовали природный газ. С целью уменьшения насыщения металла газовыми примесями из печной атмосферы поверхность слитка перед посадкой в печь накрывали листом нержавеющей стали.

Нагретые слябы осаживали по высоте для последующей вытяжки. После осадки заготовку повторно загружали в печь, нагревали до той же температуры (1100 °С) и подвергали вытяжке на плоских бойках. Энергия удара при вытяжке должна быть достаточной для достижения деформации центральных слоев заготовки. Вытяжку производили с кантовкой на 90° для снятия внутренних напряжений.

После проковки толщина заготовки составляла 50…80 мм, ширина — 700…800 мм, длина — 800…1000 мм (рис. 2). Затем от каждого сляба вырезали темплет для исследования макроструктуры и замера твердости металла с предварительным удалением окисленного слоя.

На рис. 3, *а* представлена макроструктура поковки в ее поперечном сечении, на рис. 3, *б* — в горизонтальном. После удаления окисленного слоя производили первые замеры твердости. Затем снимали слой металла толщиной 1 мм и повторно замеряли твердость. Твердость основного металла восстанавливалась после удаления 3 мм металла с поверхности образца. В абсолютном значении твердость газонасыщенного слоя после удаления окисленного слоя выше твердости основного металла на 25…35 *HB*. Поэтому перед прокаткой поковок-плит на стане с их поверхности снимали механическим путем слой толщиной 3 мм.

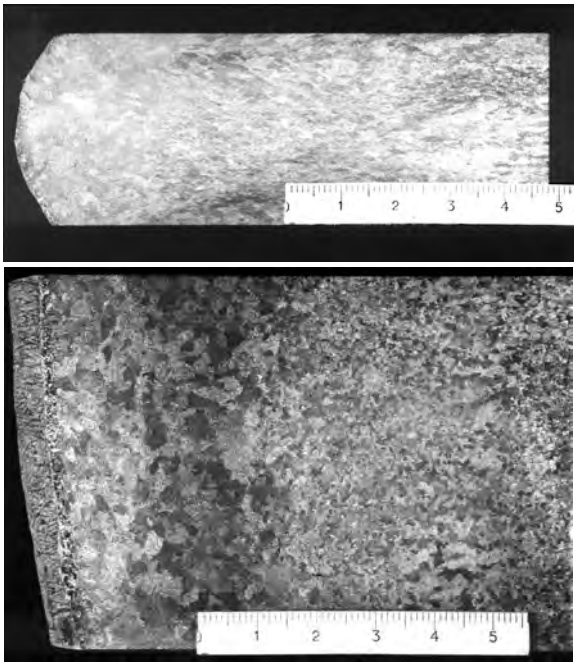


Рис. 3. Макроструктура поковки: *а* — поперечное; *б* — горизонтальное сечение

Прокатку плит осуществляли на стане «ДУО», где выкатывали требуемую ширину 1200…1400 мм, затем подкат передавали на чистовую клеть «КВАРТО» для раскатывания его на лист длиной 4000…6000 мм и толщиной 4…6 мм. Перед прокатом плиты нагревали в электрической вакуумной печи в течение 2 ч. После проката поверхность листа подвергали механической зачистке и травлению в растворах, содержащих ион-фтор.

Металл, выплавленный по приведенной технологии, содержал следующие компоненты, %: 0,8 железа, 0,07 углерода, 0,07 азота, 0,18 кислорода, 0,015 водорода.

Поскольку на прокатном стане Алчевского металлургического комбината технически затруднительно получить лист толщиной менее 4 мм, мы опробовали возможность проката слитка на лист толщиной до 3 мм на стане «ДУО-1100» усилием 5000 кН.

Работу выполняли в два этапа. На первом слитки-слябы размерами 210×400×800 мм проковывали на прессе усилием 12500 кН на размеры 130×400×(1500…1800) мм. Перед прокаткой слябы нагревали в газопламенной печи открытого типа. После прокатки на стане усилием 5000 кН получали плиты размерами 20×1200×(3000…5000) мм.

На втором этапе плиты передавали на стан «ДУО-1100», где их переделывали на лист толщиной 3 мм, шириной 1200 мм, длиной 10000…13000 мм. Перед прокаткой подкат нагревали до температуры 1100…1150 °С в печи с шагающим подом. Обжатие за один проход составляло 3…5 мм, количество проходов равнялось 5…6.

Для определения области применения титанового проката из отходов губчатого титана изготовили ряд изделий, в том числе матрицы для получения безосновной катодной меди на предприятии «Бал-

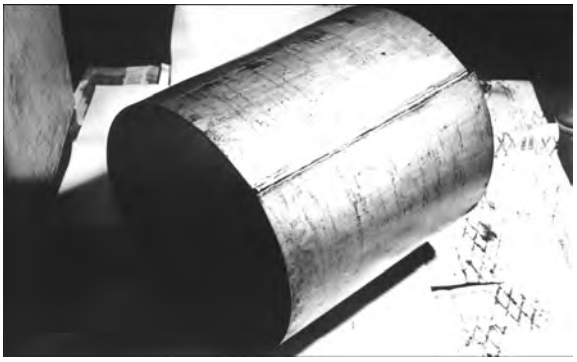


Рис. 4. Фрагмент газоходной трубы диаметром 600 мм

хашмедь», емкости для хранения различных агрессивных жидкостей на КП «Запорожский титано-магниевый комбинат», травильные ванны на Запорожском трансформаторном заводе, образцы труб газоходов диаметром 600 мм, высотой 600 мм и толщиной стенки 5 мм.

Испытания матриц показали, что качество катодной меди соответствует государственному стандарту Казахстана и не отличается от такового катодных осадков, полученных на титановых матрицах из титана марки ВТ1-0. В емкостях для хранения агрессивных жидкостей в отдельных случаях отмечено нарушение их герметичности. Это, очевидно, связано с технологией выплавки слитка, предусматривающей подачу и плавку шихты в одном кристаллизаторе.

Для изготовления высококачественного проката необходимо получать лист из слитка двойного переплава или использовать однократный переплав, но с переливом жидкого металла из кристаллизатора, в котором плавится шихта, в кристаллизатор, из которого вытягивается слиток. Это связано с тем, что вследствие повышенной газонасыщенности отходов губчатого титана за время нахождения их в кристаллизаторе, где одновременно осуществляется загрузка шихты, ее расплавление и кристаллизация металла, глубокая дегазация расплава не происходит, и в слитках образуются поры. В случае нагрева слитков титана перед деформацией в открытых газопламенных печах возникает дополнительное поглощение нагретым металлом активных газов, что, в конечном счете, сказывается на качестве листа и изделий из него.

В связи с большой протяженностью различных газоходов на КП «Запорожский титано-магниевый комбинат» представляет определенный интерес замена их титановыми как более легкими и стойкими в различных агрессивных средах. Также необходимо изучить в длительном временном промежутке поведение металла шва на образце трубы, сваренной из листа толщиной 5 мм. Показано, что в листах содержится повышенное количество следующих газовых примесей, мас. %: 0,07 азота, 0,18 кислорода и до 0,15 водорода.

Требования к содержанию газов в свариваемых листах из кондиционного металла более жесткие, поскольку существует опасность образования трещин в металле сварного шва и околошовной зоны при длительном пребывании изделий в напряженном состоянии.

В процессе изготовления фрагмента трубы в качестве присадочного материала использовали сварочную проволоку марки ВТ1-00. После сварки образец трубы периодически (один раз в год) подвергали визуальному контролю с использованием лупы с десятикратным увеличением. На протяжении 10 лет трещин в трубном фрагменте не обнаружено (рис. 4).

Таким образом, следует отметить, что из 100 % отходов губчатого титана возможно получение листового проката, а также сварных труб большого диаметра. Для этого необходимо перед прокатом нагревать заготовки в вакуумных печах, а при сварке применять сварочную присадку высшего качества.

1. *Родякин В. В., Гегер В. Э., Скрипнюк В. М.* Магнийтермическое производство губчатого титана. — М.: Металлургия, 1971. — 216 с.
2. *Применение* плазменно-дуговой технологии при выплавке слитков титана из отходов титанового производства / Ю. В. Латаш, В. С. Константинов, П. Н. Галкин и др. // Пробл. спецэлектрометаллургии. — 1985. — № 3. — С. 65–70.
3. *Реконструкция* плазменно-дуговой печи УП-100 для выплавки титановых слитков из некомпактной титановой шихты / Ю. В. Латаш, В. С. Константинов, В. В. Тэлин и др. // Там же. — 1990. — № 1. — С. 72–75.
4. *Опыт* получения листового проката из низкосортных марок губчатого титана и применения его в народном хозяйстве / Ю. В. Латаш, В. С. Константинов, В. П. Макаренко и др. // Там же. — 1989. — № 4. — С. 75–79.

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

КП «Запорожский титано-магниевый комбинат»

Поступила 24.03.2009

УДК 669.187.58

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА

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

Исследована работоспособность модулей для диспергирования расплава при индукционной плавке в секционном кристаллизаторе. Рассмотрены особенности эксплуатации диска-холодильника с принудительным охлаждением жидкостью или газом и без него.

The performance of modules for melt dispersion during induction melting in a sectional mould was investigated. Peculiarities of service of a disc-cooler with a forced cooling by liquid or gas and without it are described.

Ключевые слова: *диспергирование; секционный кристаллизатор; металлический расплав; диск-холодильник; быстрозакаленные чешуйки; аморфная структура*

Научно-технический прогресс в наукоемких отраслях промышленности неразрывно связан с применением новых материалов. Это основной путь к выходу на качественно новый этап развития любой отрасли промышленности. В этой связи в последние годы зафиксирован возрастающий интерес к проблеме использования материалов с аморфной и микрокристаллической структурами, свойства которых существенно отличаются от свойств тех же материалов в обычном кристаллическом состоянии.

Аморфную и микрокристаллическую структуру металлов и сплавов получают главным образом способами сверхбыстрой закалки из жидкого состояния, один из которых разработан в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины на базе индукционной плавки в секционном кристаллизаторе (ИПСК) [1, 2]. Суть этого способа заключается в совмещении ИПСК с процессом диспергирования расплава при помощи быстро вращающегося диска-холодильника (рис. 1). Здесь огнеупорный тигель заменен секционным водоохлаждаемым кристаллизатором, т.е. для приготовления расплава используют процесс ИПСК.

Совмещение ИПСК и сверхбыстрой закалки расплава позволяет исключить контакт металлического расплава с огнеупорным материалом тигля и тем самым решить вопрос получения быстрозакаленных металлических материалов из высокореакционных металлов, а также сплавов, содержащих указанные металлы в качестве легирующих элементов.

Особенностью данного процесса является применение расходуемой металлической заготовки заданного химического состава для получения расплава и его последующего диспергирования. Заготовку вводят снизу в секционный кристаллизатор, в ко-

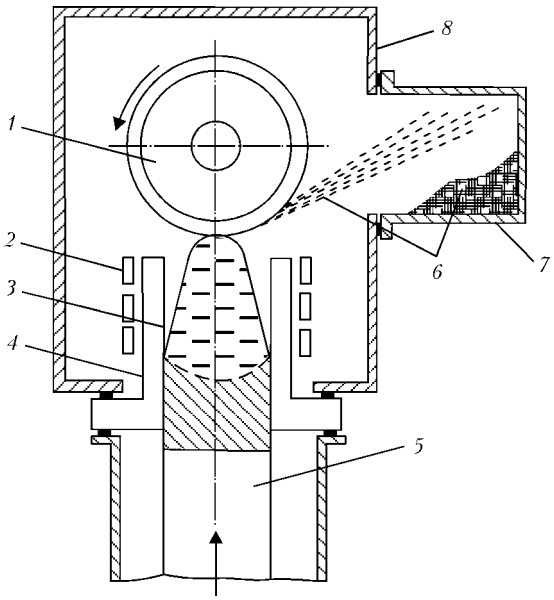


Рис. 1. Принципиальная схема процесса диспергирования расплава, совмещенная с ИПСК: *1* — диск-холодильник; *2* — индуктор; *3* — металлическая ванна; *4* — секционный кристаллизатор; *5* — расходуемая заготовка; *6* — быстрозакаленные чешуйки; *7* — бункер; *8* — плавильная камера

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

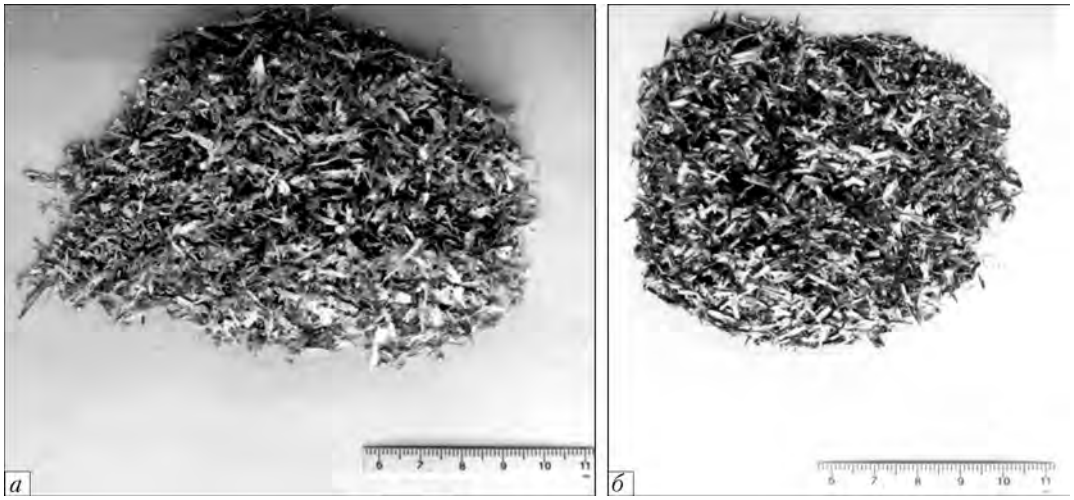


Рис. 2. Быстрозакаленный чешуйчатый материал: *а* — алюминиевый сплав Д16; *б* — титан ВТ1-0

тором производят ее расплавление на уровне индуктора. Образующаяся металлическая ванна опирается на нерасплавившуюся нижнюю часть заготовки. В зоне индуктора металлический расплав под действием электромагнитного поля отжимается от стенки секционного кристаллизатора, и его свободная поверхность принимает куполообразную форму.

Путем варьирования электрической мощности, подводимой к индуктору, вершину выпуклого мениска ванны можно приподнять над верхним срезом кристаллизатора и стабильно удерживать в таком положении. Вращающийся диск-холодильник опускают вниз до его касания с вершиной выпуклого мениска ванны и производят диспергирование металлического расплава. При контакте рабочей дорожки диска-холодильника происходит намораживание тонкой пленки металла, которая в дальнейшем отрывается от ее поверхности под действием центробежных сил. В зависимости от формы рабочей дорожки можно получать быстрозакаленный материал в виде ленты или чешуек (рис. 2).

Для стабильного процесса диспергирования требовалось создать модуль с вращающимся диском-холодильником, температура рабочей дорожки которого не изменялась бы в процессе диспергирования. Первые эксперименты по диспергированию металлического расплава выполнили с использованием неохлаждаемого медного диска-холодильника диаметром 170 мм и толщиной у основания 20 мм (рис. 3).

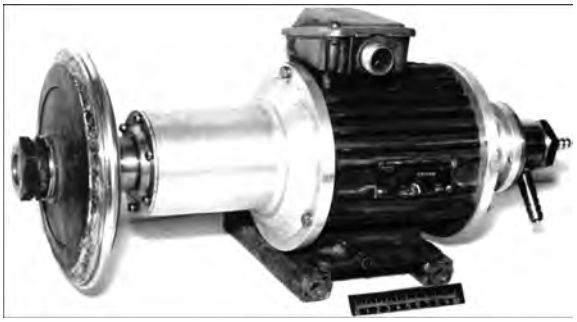
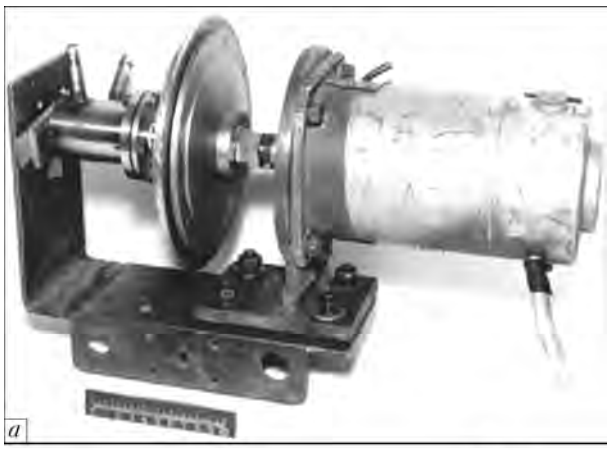


Рис. 3. Модуль для диспергирования расплава с неохлаждаемым диском-холодильником

Скорость вращения диска регулировали в диапазоне $(2\ldots4)\cdot10^3$ об/мин, что обеспечивало на дорожке диска линейную скорость 18…36 м/с. Поскольку диск-холодильник при контакте с металлическим расплавом нагревался, продолжительность



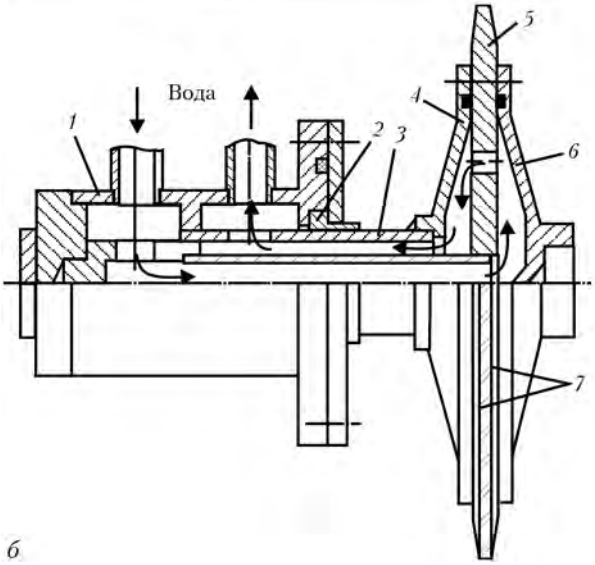


Рис. 4. Модуль для диспергирования расплава с водоохлаждаемым диском-холодильником: *а* — общий вид; *б* — схема конструкции модуля; *1* — блок водяных коллекторов; *2* — уплотняющая втулка (фторопласт); *3* — вал; *4* — крышка центрирующая; *5* — диск-холодильник; *6* — крышка глухая; *7* — прорези

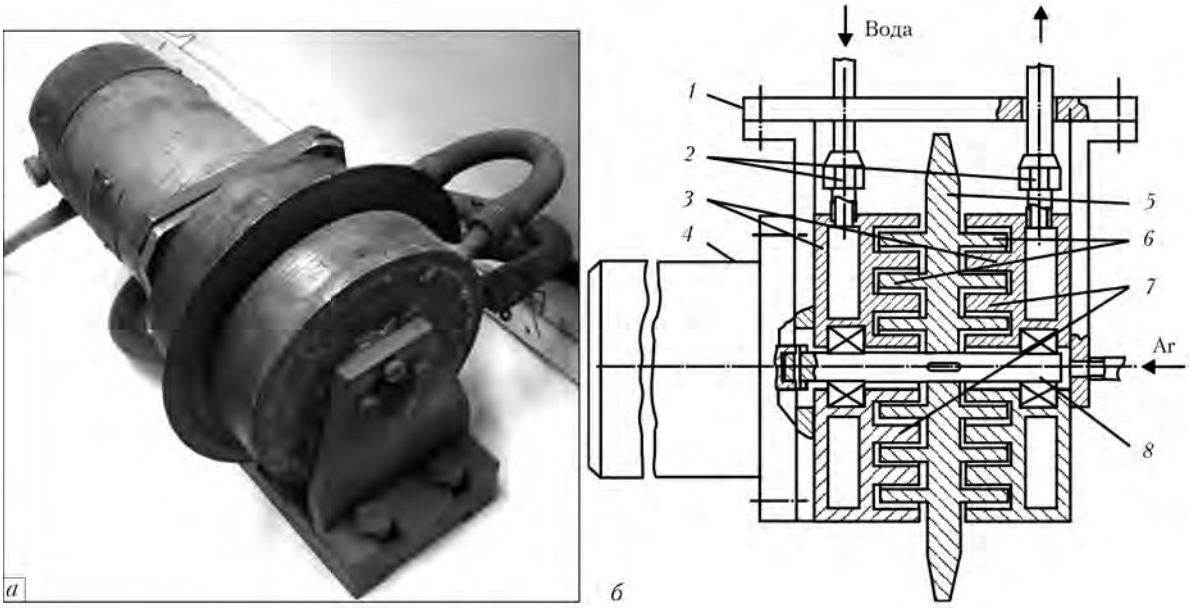


Рис. 5. Модуль для диспергирования расплава с газовым охлаждением диска-холодильника: *а* — общий вид; *б* — схема конструкции модуля; *1* — плита основы; *2* — водяная магистраль; *3* — боковые неподвижные элементы охлаждения диска-холодильника; *4* — электродвигатель; *5* — диск-кристаллизатор; *6* — цилиндрические выступы диска-холодильника; *7* — цилиндрические выступы на неподвижном элементе охлаждения; *8* — вал

контакта ограничивали 20…40 с. В противном случае происходило неконтролируемое намораживание металла на диск, и он не отрывался от рабочей дорожки.

В качестве модельного материала для диспергирования использовали алюминиевый сплав Д16. Скорость закалки металла составляла $(3…5)\cdot10^4…1\cdot10^5$ град/с. Основной недостаток неохлаждаемого диска-холодильника заключался в его нагреве в ходе диспергирования. Процесс приходилось прерывать и в течение нескольких минут (до 10) ожидать естественного охлаждения диска.

Другой его недостаток состоял в сравнительно невысокой скорости закалки расплава, причем по ходу плавки она снижалась из-за невозможности охладить диск-холодильник до температуры, которую он имел в начале процесса. В силу указанных причин производительность оказывалась низкой.

Следующим этапом в развитии предложенного Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАНУ способа диспергирования были разработка и создание модуля с водоохлаждаемым диском-холодильником (рис. 4). Диаметр диска равнялся 170 мм, толщина — 6 мм.

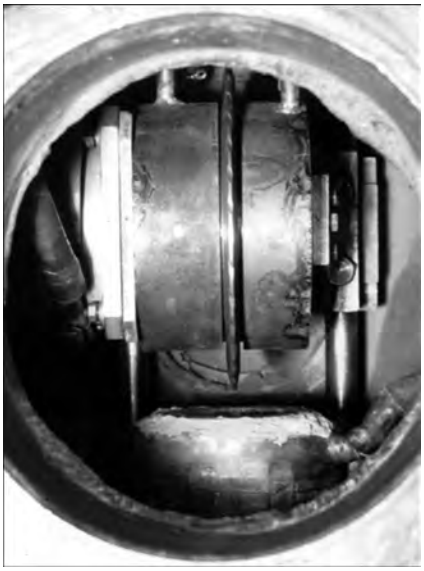


Рис. 6. Размещение модуля для диспергирования расплава в плавильной камере опытной установки

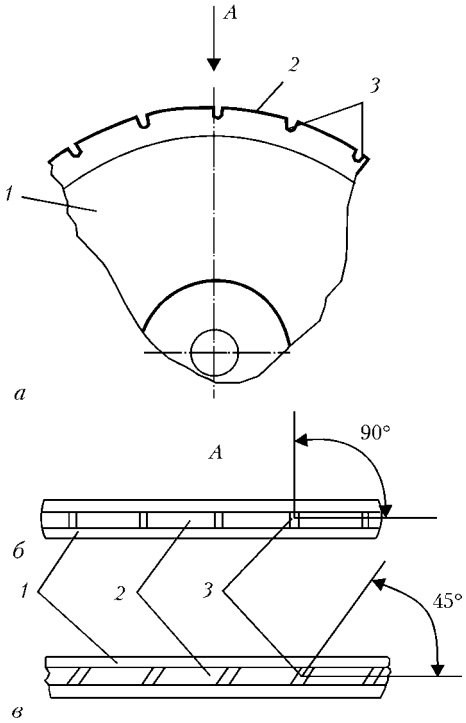


Рис. 7. Схема выполнения прорезей на рабочей дорожке диска-холодильника: *а* — вид сбоку; *б* — прорези, параллельные оси вращения диска; *в* — прорези под углом 45°; *1* — боковая поверхность; *2* — рабочая дорожка; *3* — прорези

Испытания модуля осуществляли на тех же режимах, что и неохлаждаемого медного диска-холодильника, т. е. скорость вращения регулировали в диапазоне $(2...4)\cdot10^3$ об/мин. Расход охлаждающей воды не превышал 3 л/мин. Применение водяного охлаждения сняло ограничения по длительности контакта диска-холодильника с металлической ванной, в результате возросла скорость закалки металла до $1\cdot10^6...1\cdot10^7$ град/с. Тем не менее работоспособность модуля в целом оказалась недостаточной, поскольку через 6...8 мин работы (вращения диска) происходила разгерметизация модуля по фторопластовой втулке (рис. 4, *б*). Поэтому нормальная робота модуля ограничивается примерно 6 мин. Причиной протекания воды через уплотнение является чрезвычайно высокая скорость вращения вала, на котором закреплен диск-холодильник, из-за чего от применения модуля с водяным охлаждением пришлось отказаться.

Последующие отработки режимов диспергирования выполняли с использованием модуля, имеющего газовое охлаждение (рис. 5). Данный модуль состоит из медного диска-холодильника, на котором с двух сторон выполнены концентрические выступы в виде цилиндров (рис. 5, *б*). Диск жестко закреплен на валу, который в свою очередь через муфту связан с валом электродвигателя постоянного тока. Цилиндрические концентрические выступы диска входят в соответствующие пазы, выполненные в неподвижных охлаждаемых элементах. Между цилиндрическими выступами диска-холодильника и пазами в неподвижных охлаждаемых элементах есть конструктивные зазоры размером не более 1 мм, которые позволяют диску-холодильнику свободно вращаться в охлаждаемых элементах. Охлаждаемые боковые элементы жестко закреплены на плите основы. Подвод и отвод воды к элементам происходят с помощью водяной магистрали. Для интенсификации охлаждения диска-холодильника во время диспергирования расплава в зазоры между цилиндрическими выступами диска и соответствующими пазами элементов производится подача инертного газа.

При наличии малых зазоров между охлаждаемыми элементами и диском, вращающимся с большой скоростью, подвод инертного газа в зазор интенсифицирует охлаждение диска-холодильника и его рабочей дорожки. Это позволяет в течение неограниченного промежутка времени выполнять диспергирование расплава.

Габаритные размеры дали возможность разместить модуль для диспергирования в плавильной камере установки ИПСК, а соответствующие вводы обеспечивали питание электропривода током, водоохлаждение элементов модуля и подведение инертного газа (рис. 6).

Для получения лент использовали диски-холодильники с разной шириной рабочей дорожки. Длина полученных лент колебалась от 0,2 до 0,5 м. Однако основное внимание уделяли получению металлических чешуек, поскольку их проще размалывать в шаровых мельницах, т. е. переводить в порошкообразный вид для последующего изготовления образцов способом спекания.

Изготовление металлических чешуек имеет свою специфику. Для этого рабочую дорожку диска-холодильника необходимо разделить на определенные отрезки — прорези. Испытания диска с прорезями на рабочей дорожке показали, что процесс диспергирования проходит стабильно только при определенном направлении прорезей относительно оси вращения диска. В случае перпендикулярного расположения прорезей на дорожке получить металлическую чешую невозможно (рис. 7, *б*), поскольку при касании рабочей дорожки значительной части поверхности расплава металлопродукт имеет вид брызг без соответствующей формы. Таким образом, использование диска-холодильника с перпендикулярными прорезями на рабочей дорожке не дает возможности получать металопродукт в виде чешуек.

Получение металлических быстрозакаленных чешуек стало возможным благодаря прорезям на рабочей дорожке, выполненным под углом 45° (рис. 7, *в*). Благодаря этому процесс диспергирования протекает стабильно, без выбросов металлической ванны, а получаемый металопродукт имеет четкую форму чешуек с определенной длиной, что соответствует расстоянию между прорезями на рабочей дорожке диска-холодильника.

На созданном оборудовании получены образцы быстрозакаленных металлических материалов на основе сплава алюминия Д16, сплава системы никель–титан (нитинол), технически чистого титана и др. (рис. 2).

1. *Пат. 69514 Україна,* МПК 8 B 22 D 27/00. Спосіб отримання аморфних та дрібнозернистих металів / Б. Є. Патон, Ю. В. Латаш, І. В. Шейко та ін. — Опубл. 15.09.2004; Бюл. № 9.
2. *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.

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

Поступила 23.02.2009

УДК 669.187.526.001.52

ПОЛУЧЕНИЕ РАСХОДУЕМЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ИЗ ГУБЧАТОГО ТИТАНА ДЛЯ ПЕРЕПЛАВА В ГАРНИСАЖНЫХ ЛИТЕЙНЫХ ПЕЧАХ

В. С. Константинов, В. А. Шаповалов, С. М. Теслевич, С. И. Давыдов, Л. Я. Шварцман

Описан процесс получения расходуемых электродов для вакуумно-дуговых литейных печей. Наряду с существующими способами (вакуумно- и плазменно-дуговым) приведена технология изготовления комбинированного электрода, в состав которого входят прессованная штанга и цилиндрические заготовки от литниковой системы. Отмечено, что качество фасонних отливок, полученных из комбинированного электрода, соответствует техническим условиям.

The process of producing consumable electrodes for vacuum-arc foundry furnaces is described. Along with existing methods (vacuum- and plasma-arc) the technology of manufacture of a combined electrode , whose composition includes a pressed rod and cylindrical billets from a tapping system is described. It is outlined that the quality of shaped castings, produced of a combined electrode, is in compliance with technical specifications.

Ключевые слова: *вакуум; печь; плазма; дуга; гарнисаж; электрод; губчатый титан; слиток*

Большая активность нагретого до высоких значений температуры титана требует создания технологических процессов, сокращающих пребывание металла на всех стадиях передела при получении готовых изделий. Одним из таких способов является фасонное литье, позволяющее получать изделия сложной конфигурации массой от десятков граммов до нескольких тонн [1].

В современных литейных гарнисажных печах необходимую массу жидкого металла получают в основном способом дуговой плавки расходуемого электрода в вакууме. Диаметры расходуемых электродов составляют 250…1000 мм.

Стоимость расходуемого электрода существенно влияет на конечную цену отливки, поэтому постоянно ведутся поиски наименее затратной технологии получения расходуемых электродов необходимых размеров.

В условиях КП «Запорожский титано-магниевый комбинат» расходуемые электроды изготовляют размерами 200×200×400 мм из слитка вакуумно-дуговой плавки (ВДП) диаметром 800 мм и высотой до 3000 мм. Переплаву подвергают губчатый титан марок ТГ-100 и ТГ-ТВ в определенных соотношениях [2].

После плавки слиток механическим способом разрезают на диски диаметром 800 мм и высотой 200 мм с последующей газовой резкой диска на заготовки 200×200×400 мм. По этой технологии металл расходуемых электродов в местах реза насыщается азотом и кислородом, кроме того, 10 % металла составляют безвозвратные потери. При переплаве таких электродов происходит насыщение жидкого металла в тигле газовыми примесями, в результате чего ухудшаются пластические характеристики готовых отливок.

Более прогрессивная технология заключается в получении расходуемых электродов диаметром 270 мм в двухручьевой шестиплазмотронной плазменно-дуговой печи УП-100 [3]. Печь оборудована двумя рядом расположенными кристаллизаторами диаметром 278 мм, что позволяет выплавлять одновременно два слитка длиной до 2500 мм. Слитки механическим путем разрезали на мерные шашки длиной до 400 мм. Размеры электродов по диаметру и длине соответствуют техническим условиям к электродам для вакуумно-дуговых гарнисажных печей «Нева», установленных на комбинате.

Применение плазменной технологии позволило улучшить качество отливок за счет уменьшения содержания газовых примесей в жидком титане в связи с исключением операции газовой резки, присут-

© В. С. КОНСТАНТИНОВ, В. А. ШАПОВАЛОВ, С. М. ТЕСЛЕВИЧ, С. И. ДАВЫДОВ, Л. Я. ШВАРЦМАН, 2009

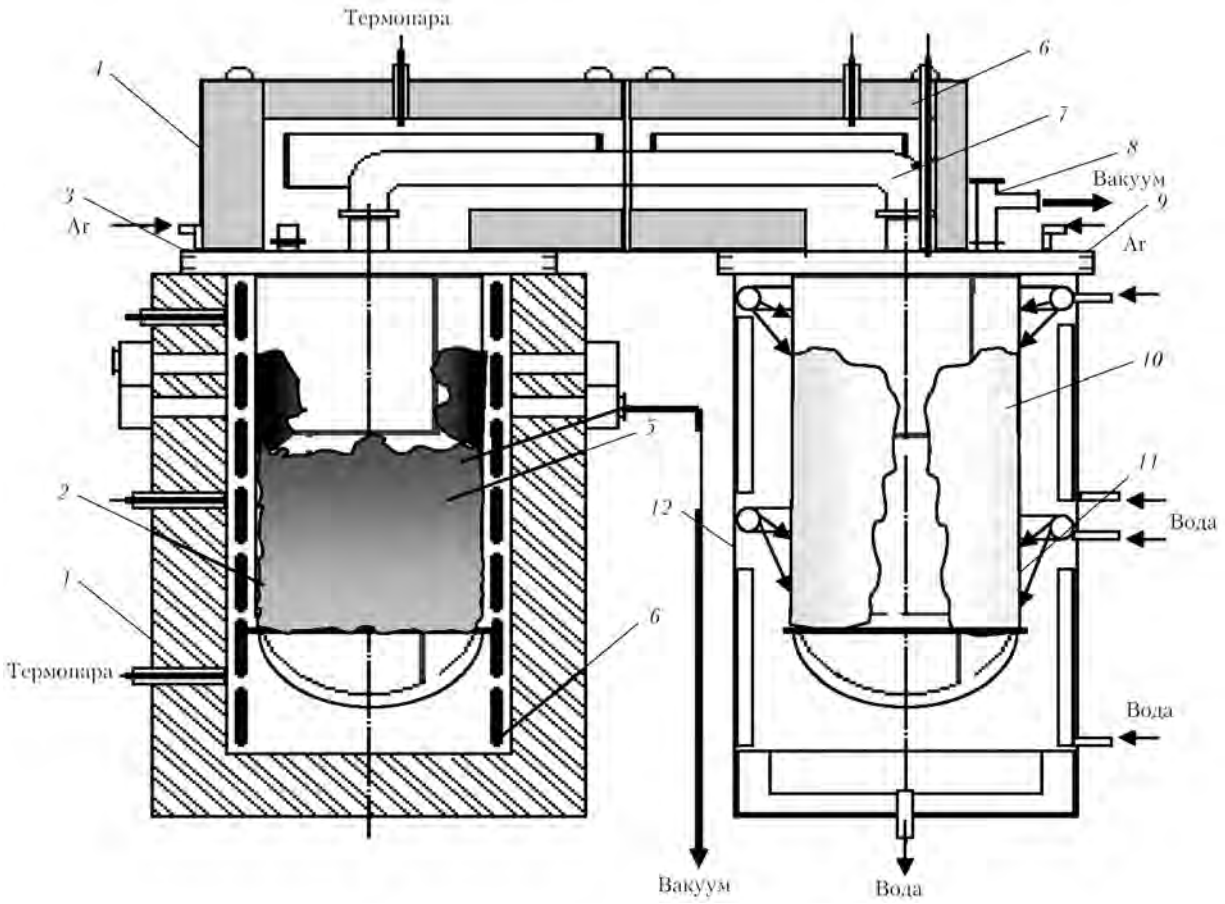


Рис. 1. Опытно-промышленная установка аппарата вакуумной сепарации губчатого титана со стоящим рядом конденсатором производительностью 3,8 т/цикл: *1* — электропечь; *2* — реторта–реактор; *3* — крышка реторты–реактора; *4* — электропечь колпаковая для обогрева крышки реактора и паропровода; *5* — блок титансодержащей реакционной массы; *6* — электропечь колпаковая для обогрева крышки конденсатора и паропровода; *7* — паропровод; *8* — патрубок для вакуумирования; *9* — крышка реторты–конденсатора; *10* — конденсат; *11* — реторта–конденсатор; *12* — холодильник

ствующей в технологии получения расходуемых электродов способом ВДП.

Применение плазменной технологии при получении расходуемых электродов несколько улучшило технико-экономические показатели производства фасонного литья, но из-за повышенного расхода электроэнергии, по сравнению с ВДП, и необходимостью использования аргона в системе газоснабжения плазмотронов, они имели относительно высокую цену.

Проведены эксперименты по получению фасонных отливок с использованием комбинированных электродов, в состав которых входят спрессованный в электрод губчатый титан и оборотный металл литниковой системы отливок.

Следует отметить, что неоднократно предпринимались попытки получения отливок с использованием прессованного расходуемого электрода. Однако литой металл отличался повышенной пористостью, и указанная технология не получила широкого развития.

Одной из причин могло быть повышенное содержание водорода и влаги в губчатом титане, полученном по стандартной технологии, предусматривающей на первом этапе высокотемпературное восстановление титана магнием из четыреххлористого титана в аппаратах восстановления [4]. Полученная реакционная масса, состоящая из титана, дихлорида магния и магния, охлаждалась в течение нескольких часов и затем в специально обо-греваемом высоковакуумном аппарате осуществлялась очистка титана от магния и дихлорида магния.

В процессе вакуумной сепарации из губчатого титана удаляли поверхностно-адсорбированную влагу, однако в порах оставались кристаллогидратная влага, дихлорид магния, удаляемые с большим трудом из глубинных слоев блока губчатого титана. При переплаве последнего эти примеси в значительной степени удаляются из зоны плавки, однако часть их переходит в жидкий металл, тигель, а затем в отливку. По мере совершенствования оборудования и технологии получения губчатого титана количество влаги и газовых примесей сокращается.

В последние годы на КП «ЗТМК» созданы новое оборудование и технология получения губчатого титана, устанавливаются большегрузные аппараты восстановления и вакуумной сепарации ПВС-410 с расположенным рядом конденсатором цикловой производительностью 3,8 т губчатого титана [5]. Схема установки представлена на рис. 1. Отличительная особенность нового оборудования заключается в отсутствии операции многочасового охлаждения аппарата восстановления.

Рис. 2. Комбинированные расходуемые электроды перед плавкой в печи «Нева»

Это обусловлено тем, что аппарат восстановления и конденсатор связаны между собой обогреваемым паропроводом. Такая конструкция установки позволяет сократить время между началом и окончанием процесса восстановления титана из тетрахлорида титана, а также проводить вакуумную сепарацию практически без разгерметизации аппарата восстановления, что значительно уменьшает степень насыщения блока губчатого титана газовыми примесями и влагой.

С учетом высокого качества губчатого титана, полученного по новой технологии, опробовали технологию получения отливок с применением прессованной заготовки. Для изготовления прессованных электродов использовали установленный на комбинате горизонтальный пресс усилием 63 МПа. При помощи прессования получали брикеты диаметром 150 мм и высотой 150 мм, которые затем способом аргонодуговой сварки соединяли в цельную заготовку высотой 450 мм.

Для уменьшения вероятности образования большого количества пор и нарушения герметичности отливки к двум прессованным электродам диаметром 150 мм и высотой 450 мм приваривали способом аргонодуговой сварки части литниковой системы от предыдущей плавки с минимальным количеством газовых примесей. Общий вид комбинированного расходуемого электрода представлен на рис. 2.

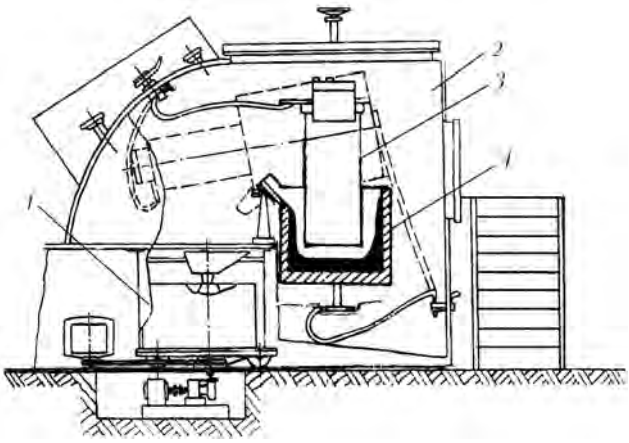


Рис. 3. Схема вакуумно-дуговой литейной печи «Нева»: *1, 2* — соответственно заливочная и плавильная камеры; *3* — расходуемый электрод; *4* — тигель

Рис. 4. Общий вид вакуумно-дуговой литейной печи «Нева»

Плавку комбинированных электродов выполняли в вакуумно-дуговой литейной гарнисажной печи, принципиальная схема и общий вид которой приведены на рис. 3, 4.

Печь включает следующие основные узлы: герметичную плавильную камеру, титановый тигель, электрододержатель, заливочную камеру и вакуумную систему [6].

Продолжительность дегазации увеличили на 20 %, по сравнению со стандартной технологией, когда в печь загружали расходуемый электрод, отлитый в вакуумно-дуговой или плазменной печах. Режимы плавки также отличались от принятой технологии. Для удовлетворительной дегазации металла на торце переплавляемого комбинированного электрода, а также в капле и расплаве металла в тигле ток поддерживали в пределах 9…10 кА, по сравнению с 12 кА при переплаве литого электрода. Соответственно время плавки увеличилось на 10 мин.

Плавка на пониженных режимах способствовала эффективному удалению газовых примесей. По окончании сплавления электрода делали кратковременную выдержку расплава для дополнительной дегазации и путем поворота тигля жидкий металл

Рис. 5. Отливка заготовки детали запорной арматуры, полученной в вакуумно-дуговой литейной печи «Нева»

сливали в металлическую форму. После охлаждения отливки (рис. 5) отправляли на гидравлические испытания. Получены положительные результаты. Также осуществляли испытания механических свойств и определяли содержание газовых примесей.

Испытания показали, что механические свойства соответствуют действующим ТУ 48-10-8–86 ($\sigma_в$ — до 500 МПа, δ — более 5 %, KCU — 0,1 МДж/м^2, среднее содержание кислорода в отливках составляло 0,15, азота — 0,075, водорода — 0,004 и углерода — 0,09 мас. %), что подтверждает эффективность предложенной технологии получения расходуемых электродов.

1. *Производство* фасонных отливок из титановых сплавов / Е. Л. Бибиков, С. Г. Глазунов, А. А. Неуструев и др. — М.: Металлургия, 1983. — 298 с.
2. *Анализ* технологических схем изготовления прессованной заготовки из некомпактной шихты для получения слитка титана первого переплава / Ю. В. Латаш, В. Н. Замков, В. С. Константинов и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1998. — № 2. — С. 35–38.
3. *Реконструкция* плазменно-дуговой печи УП-100 для выплавки титановых слитков из некомпактной титановой шихты / Ю. В. Латаш, В. С. Константинов, В. В. Тэлин и др. // Там же. — 1990. — № 1. — С. 72–75.
4. *Родякин В. В., Гегер В. Э., Скрыпнюк В. М.* Магнийтермическое производство губчатого титана. — М.: Металлургия, 1971. — 216 с.
5. *Проблемы* надежности аппарата магнийтермического получения губчатого титана повышенной цикловой производительности / С. М. Теслевич, В. В. Тэлин, А. Н. Пампушко и др. // Современ. электрометаллургия. — 2004. — № 2. — С. 50–53.
6. *Неуструев А. А., Ходорковский Г. Л.* Вакуумные гарниссажные печи. — М.: Металлургия, 1967. — 272 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
КП «Запорожский титано-магниевый комбинат»

Поступила 24.03.2009

УДК 669.187.2

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ ИЗ Ti, Ti36Al, Ti/Al, ПОЛУЧЕННЫХ СПОСОБОМ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ИСПАРЕНИЯ

А. В. Демчишин, В. С. Голтвяница, С. К. Голтвяница, Л. Д. Кулак, О. А. Токарев, Г. А. Автономов

Получены покрытия из Ti, Ti36Al и Ti/Al толщиной 40...140 мм на подложках из нержавеющей стали и поликора с использованием нефильтрованного вакуумно-дугового осаждения. Морфологию поверхности, поперечные изломы, микроструктуру, микротвердость и плотность конденсатов изучали в зависимости от электрического смещения подложки, температуры катода и и толщины субслоев в многослойных Ti/Al конденсатах. Результаты исследований показали существенное влияние указанных технологических параметров на структуру и свойства вакуумно-дуговых конденсатов.

Coatings of Ti, Ti36Al and Ti/Al of 40...140 mm thickness were produced on substrates of stainless steel and polycor using a non-filtered vacuum-arc deposition. Morphology of surface, transverse fractures, microstructure, microhardness and density of condensates were studied depending on electric displacement of substrate, temperature of cathode and thickness of sublayers in multi-layer Ti/Al condensates. Results of investigations showed the significant effect of the mentioned technological parameters on structure and properties of vacuum-arc condensates.

Ключевые слова: *вакуумно-дуговое осаждение; защитные покрытия; конденсаты; титан; фазовый состав; структура*

Введение. Конденсаты чистого титана, его сплавов с алюминием и многослойных композиций системы Ti/Al представляют большой практический интерес благодаря высоким значениям коррозионной стойкости в агрессивных средах и прочности, а также низкому удельному весу. Указанные материалы могут быть использованы в качестве защитных покрытий в химической промышленности, авиакосмической технике, автомобилестроении и медицинской технике. Например, алюминиды титана являются перспективными материалами для покрытий, эксплуатируемых в условиях высоких температур. Многослойные Ti/Al композиции можно использовать для получения новых типов защитных покрытий, а также создания самостоятельных изделий из интерметаллических и неразъемных соединений способом диффузионной сварки [1, 2].

Осаждение покрытий с помощью нефильтрованного вакуумно-дугового испарения позволяет в значительной степени экономить дорогие материалы,

© А. В. ДЕМЧИШИН, В. С. ГОЛТВЯНИЦА, С. К. ГОЛТВЯНИЦА, Л. Д. КУЛАК, О. А. ТОКАРЕВ, Г. А. АВТОНОМОВ, 2009

поскольку микрокапельная фаза в плазменных потоках, эмитируемая с большими скоростями из катодных пятен в направлении к подложкам, вносит свой вклад в формирование покрытий.

В данной работе представлены результаты исследований влияния некоторых технологических параметров (электрическое смещение на подложке, толщина субслоев в многослойных композициях) на структуру, фазовый состав и твердость конденсатов чистого титана, бинарного сплава Ti–Al и многослойной композиции Ti/Al, полученных с помощью нефильтрованного катодно-дугового испарения в вакууме.

Методика эксперимента. Покрытия из Ti, Ti–Al и Ti/Al на подложках из нержавеющей стали и поликристаллического корунда получены посредством нефильтрованного вакуумно-дугового осаждения. Для этих целей использовали модифицированную вакуумно-дуговую установку «Булат-3Т». Ее схематическое изображение представлено на рис. 1. Цилиндрические катоды торцевого типа диаметром 64 мм и высотой 45 мм из чистых металлов (титана, алюминия) изготовили путем механического точения из слитков электронно-лучевого переплава диаметром 70 мм. Катоды из труднообрабатываемого титанового сплава получали способом вакуумно-дугового переплава титана и алюминия в аргоне, а их хвостовую часть (со стороны охлаждения) отлили в едином технологическом цикле из чистого титана с целью обеспечения хорошей механической обрабатываемости охлаждаемого торца катода. Подложками для покрытий служили листовые заготовки из

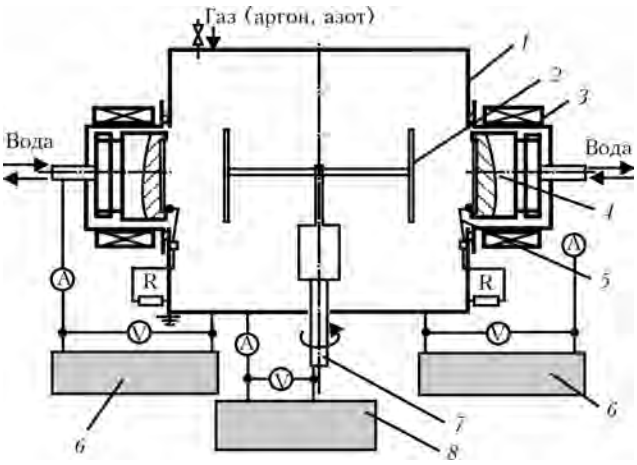


Рис. 1. Схема вакуумно-дуговой установки «Булат-3Т»: *1* — вакуумная камера; *2* — подложка; *3* — стабилизирующая катушка; *4* — торцевой катод; *5* — поджигатель; *6* — источник питания дугового разряда; *7* — механизм вращения подложкодержателя; *8* — источник питания для подачи электрического смещения на подложкодержатель

нержавеющей стали 12×17 размерами 100×100×0,3 мм, а также шлифованные пластинки поликора (70×50×0,25 мм). Осаждение конденсатов осуществляли в рабочей камере с аргоном высокой чистоты при давлении $3 \cdot 10^{-1}$ Па. Очистку подложек при помощи бомбардировки их поверхностей ионами аргона, а затем металлическими ионами катодных материалов перед нанесением покрытий производили при подаче на подложку отрицательного потенциала 1000 В и при давлении в камере $3 \cdot 10^{-2}$ Па для предотвращения образования микродуг и повреждений ими поверхности конденсации.

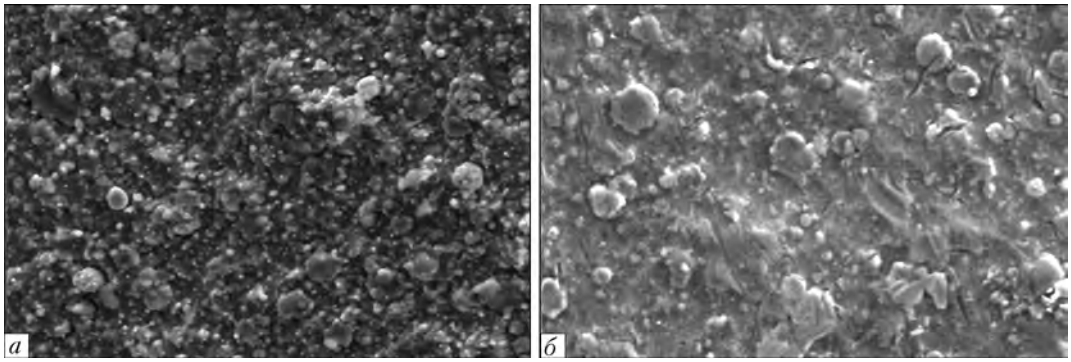


Рис. 2. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) микрофотографии морфологии поверхности титанового покрытия, полученного при отрицательных напряжениях смещения, подаваемых на стальную подложку: *а* — 50; *б* — 180 В, ×860

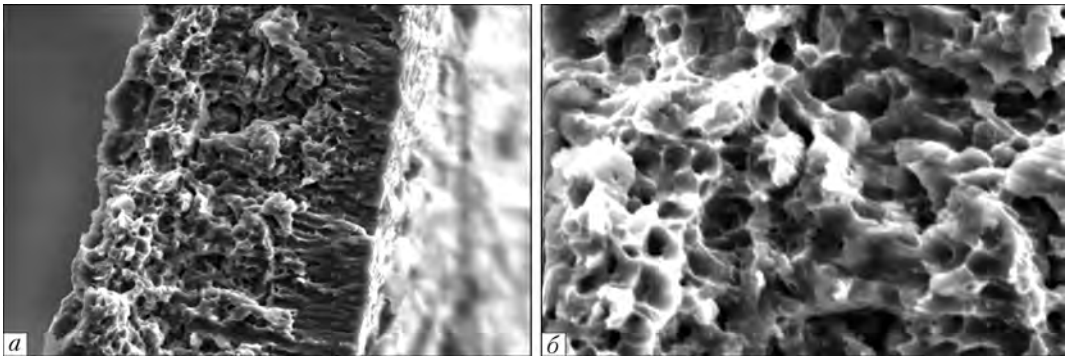


Рис. 3. Микрофотографии излома титанового покрытия; смещение подложки –50 В; толщина слоя 60 мкм; ×1000 (*а*); ×3000 (*б*)

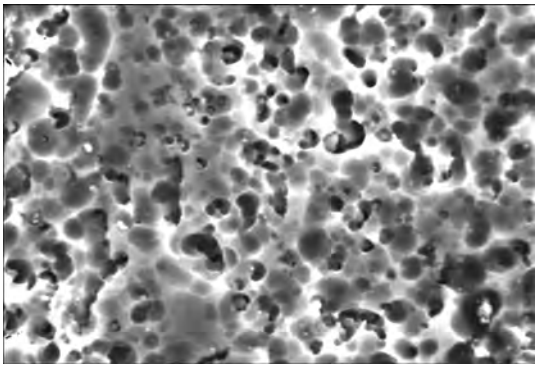


Рис. 4. Микрофотография полированного шлифа поперечного сечения титанового покрытия; смещение подложки −50 В; толщина слоя 60 мкм; ×3000

После очистки путем ионной бомбардировки и одновременного прогрева подложек до 400…450 °С (3…5 мин) отрицательный потенциал снижался до −180 и −50 В, и осаждались покрытия. Расстояние между подложкой и катодом составляло 125 мм. Ток дуги варьировали в пределах 100…140 А в зависимости от материала катода.

Конденсацию многослойных конденсатов Ti / Al осуществляли путем периодического перемещения подложек от одного катода к другому с помощью механизма вращения подложкодержателя консольного типа при непрерывном испарении катодов. Длительность осаждения субслоев задавали с помощью реле времени, связанного с электрической цепью привода вращения вертикального вала с вакуумным вводом в рабочую камеру установки (рис. 1, поз. *7, 8*). Продолжительность конденсации каждого субслоя в данном исследовании составляла 30, 20 и 10 с, что позволило получать конденсаты с модуляцией многослойной структуры 500, 350 и 200 нм. Общая длительность осаждения таких покрытий равнялась 60 мин, а суммарная толщина — 50…90 мкм. Толщина однослойных конденсатов титана и титанового сплава Ti36Al достигала соответственно 90 и 140 мкм.

Структуру покрытий исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа «JEOL 733» и трансмиссионного электронного микроскопа «JEOL 200». Рентгенографический анализ выполняли на установке «ДРОН-3», а рентгенофазовый анализ — на установке HZG-4 в Cu_{K_α} излучении с использованием внешнего стандарта — кремния. Обрабатывали полученные рентгенограммы с помощью прикладных программ «New Profile-356», «Leasquar», а расчитывали периоды решетки — с использованием программы «Lattice». Микротвердость конденсатов в поперечном сечении измеряли приборами ПМТ-3М и «Микрон-Гамма». Плотность конденсатов чистого титана определяли гидростатическим взвешиванием.

Экспериментальные результаты и обсуждение. Структура поверхности титановых вакуумно-дуговых конденсатов, сформированных на стальных подложках при различных опорных напряжениях (−50 и −180 В), представлены на рис. 2.

Микрофотографии излома титанового покрытия, осажденного на подложку с электрическим смещением −50 В, демонстрируют наличие пористой структуры (рис. 3). Нижняя часть конденсата, прилегающая к подложке, имеет множество пор разме-

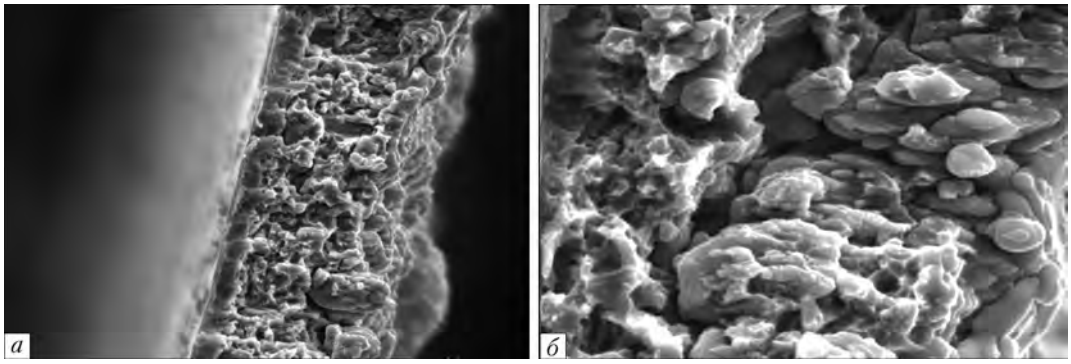


Рис. 5. Микрофотографии излома титанового покрытия, сформированного из микрокапельной фазы; смещение подложки −50 В; толщина покрытия 40 мкм; ×1000 (*а*); ×3000 (*б*)

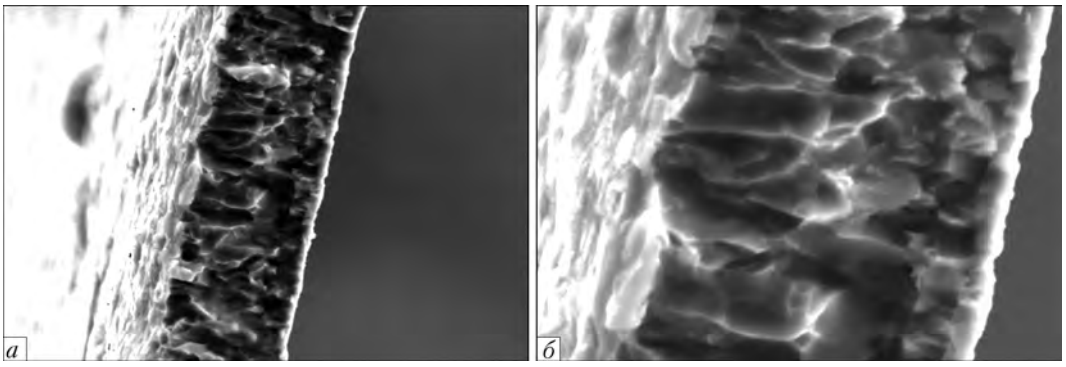


Рис. 6. Микрофотографии излома титанового покрытия; смещение подложки −180 В; толщина слоя 20 мкм; ×1000 (*а*); ×4000 (*б*)

ром 0,5…3,0, а верхняя часть осажденного слоя — столбчатую структуру. Причина образования последней заключается в более высокой температуре поверхности осаждения на этом этапе роста покрытия.

Полированный шлиф поперечного сечения титанового покрытия, осажденного при электрическом смещении подложки −50 В, также показывает наличие множества пор округлой формы (рис. 4).

Формирование пористого титанового слоя зафиксировано и в случае набрызгивания микрокапель из неохлаждаемого титанового катода на стальную подложку с электрическим смещением −50 В. Микрофотографии излома такого слоя представлены на рис. 5.

Измерения плотности таких титановых конденсатов, отделенных от медных подложек и прошедших гидростатическое взвешивание в четыреххлористом углероде, показали, что их пористость составляет соответственно 15 и 30 % в зависимости от температуры титанового катода. Вакуумно-дуговое испарение водоохлаждаемого катода приводит к формированию конденсатов с меньшей пористостью.

Повышение значения отрицательного потенциала, подаваемого на подложку, от −50 до −180 В способствует формированию более плотного титанового конденсата. На рис. 6 представлена структура излома титанового конденсата, полученного при скорости осаждения 1,0 мкм/мин на стальной подложке с электрическим смещением −180 В.

Изучение структуры титанового конденсата в поперечном сечении показало наличие столбчатых кристаллитов по всей толщине конденсированного слоя (рис. 7).

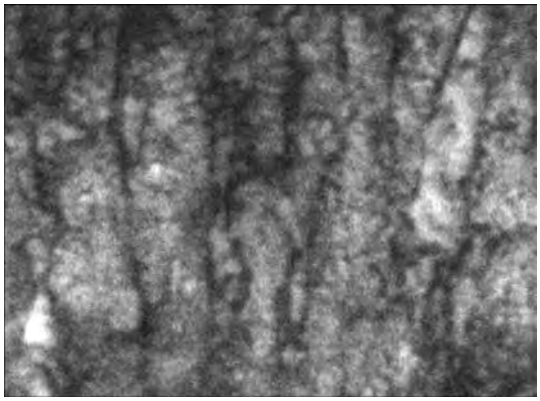


Рис. 7. Микроструктура титанового конденсата в поперечном сечении; электрическое смещение стальной подложки −180 В, ×2000

Измерения микротвердости титановых конденсатов на приборе ПМТ-3М при нагрузке 0,50 Н показали, что твердость конденсированных слоев, сформированных при электрическом смещении −50 и −180 В, составляет соответственно 2,36 и 2,20 ГПа.

Аналогичные измерения микротвердости, проведенные на приборе «Микрон-Гамма» с записью кривых нагружения и последующей разгрузки, показали, что титановый конденсат, полученный на подложке с потенциалом −50 В, имеет микротвердость 2,96 ГПа, модуль упругости — 96 ГПа, а коэффициент пластичности — 0,765. Коэффициент пластичности массивного титана равняется 0,9. Меньшие значения пластичности вакуумно-дугового титанового конденсата объясняются его высокой пористостью.

В ходе рентгенографических исследований титановых конденсатов, полученных при потенциале

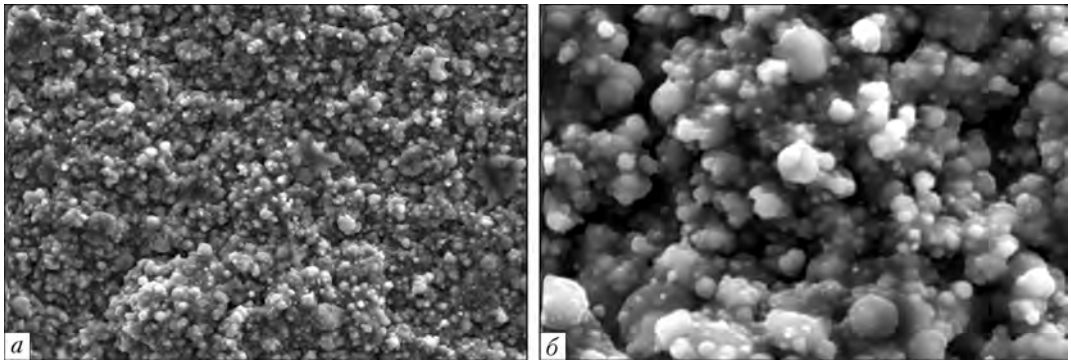


Рис. 8. СЭМ микрофотографии морфологии поверхности покрытия TiAl, полученного при отрицательном напряжении смещения −50 В, подаваемого на стальную подложку; ×1000 (*а*); ×4000 (*б*)

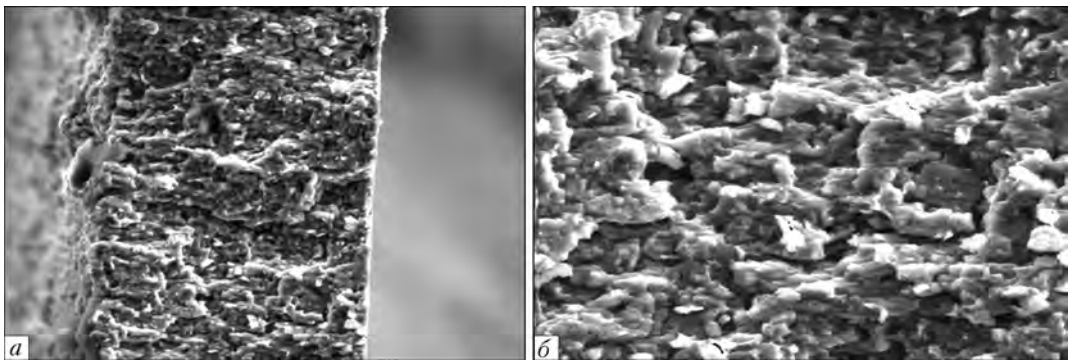


Рис. 9. Микрофотографии излома покрытия из сплава TiAl; напряжение смещения на стальной подложке −50 В; ×600 (*а*); ×1500 (*б*)

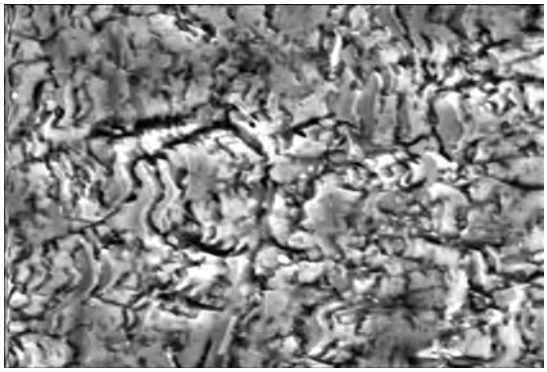


Рис. 10. Микрофотография полированного шлифа поперечного сечения титанового покрытия; смещение стальной подложки – 50 В; толщина слоя 100 мкм; ×3000

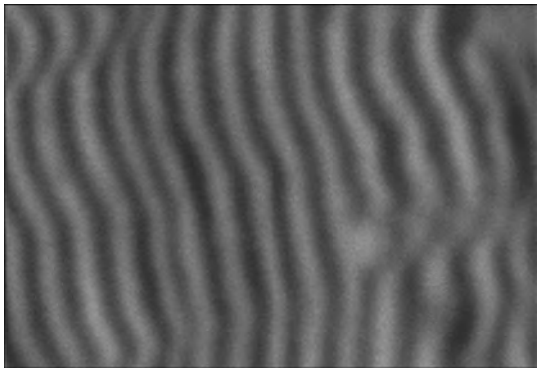


Рис. 11. СЭМ микрофотографии поперечного сечения вакуумно-дугового многослойного Ti/Al покрытия; длительность осаждения субслоев 20 с; ×20000

смещения –180 В, установлено, что конденсированные слои содержат α-фазу и текстуру [001]. Параметры ГПУ решетки имеют следующие значения: a = 2,9511 А; c = 4,6871; c/a = 1,588.

Полученные результаты показали, что вакуумно-дуговое осаждение слоев титана позволяет изменять в широком диапазоне микроструктуру и морфологию покрытий. Наличие микрочастиц в вакуумно-дуговых конденсатах в случае использования нефильтрованной металлической плазмы для формирования конденсированных слоев на подложках с малым опорным напряжением дает возможность получать пористые титановые покрытия с большой развитой поверхностью. Указанные свойства таких конденсатов могут быть использованы в медицинской практике для нанесения функциональных покрытий на имплантаты из титановых сплавов.

При изучении структуры вакуумно-дуговых конденсатов титанового сплава Ti–36 мас. % Al толщиной 100…140 мкм, сформированных при потенциале электрического смещения на подложке –50 В, обнаружено, что топография поверхности и поперечный излом этих конденсатов близки к структурам чистого титана (рис. 8, 9).

Микроструктура такого конденсата, полученная на шлифе поперечного сечения, также свидетельствует о наличии несплошностей в объеме конденсированного сплава (рис. 10).

Рентгенографический анализ стружки исходного материала и конденсатов титанового сплава Ti–Al, сформированных на поликоровой и стальной подложках при потенциалах электрического смещения соответственно –50 и –180 В, показал, что материал катода содержит γ–TiAl фазу с гранецентрированной тетрагональной решеткой и соответствует химическому составу Ti–36 мас. % Al (таблица).

Фазовый состав и параметры кристаллической решетки исходного Ti–36 мас. % Al сплава и осажденных покрытий

Объект исследования	Фазовый состав	a, А	c, А	c/a
Металлическая стружка катода	TiAl(γ-фаза)	3,991	4,0536	1,0156
Покрытие на поликоре	Ti_3Al + α-Ti	2,946 α-Ti 5,812 Ti_3Al	4,644 α-Ti 4,60 Ti_3Al	1,576 0,792
Покрытие на нержавеющей стали	Ti_3Al + α-Ti + β-Ti	5,828 Ti_3Al 3,214 β-Ti 2,914 α-Ti	4,657 Ti_3Al 4,657 α-Ti	0,799 1,598

Вакуумно-дуговой конденсат, полученный на поликоровой подложке при электрическом смещении –50 В, включает соединение Ti_3Al и α-Ti. Покрытие на нержавеющей стали, сформированное при электрическом потенциале –180 В, содержит, помимо этих фаз, дополнительно около 4 мас. % β–Ti-фазы, что можно объяснить взаимодействием растущего конденсата с подложкой, содержащей хромовый β-стабилизатор.

Изменение фазового состава конденсированных слоев титанового сплава, по сравнению с исходным материалом, свидетельствует об обеднении конденсата алюминием. Анализ диаграммы состояния системы Ti–Al показал, что содержание алюминия в конденсатах, сформированных при потенциалах смещения –50 и –180 В, составляет соответственно 25 и 20 мас. %. Полученные данные свидетельствуют о зависимости химического состава покрытий от потенциала подложки, а это дает возможность управлять составом посредством данного технологического параметра. Изменение состава вакуумно-дуговых покрытий Ti–Al в зависимости от электрического потенциала на подложке отмечено и в работе [3], где уменьшение содержания алюминия с увеличением напряжения смещения объясняется различиями в степени ионизации титана и алюминия. Степень ионизации паровой фазы титана выше (80 %), чем пара алюминия (50 %). Это приводит к

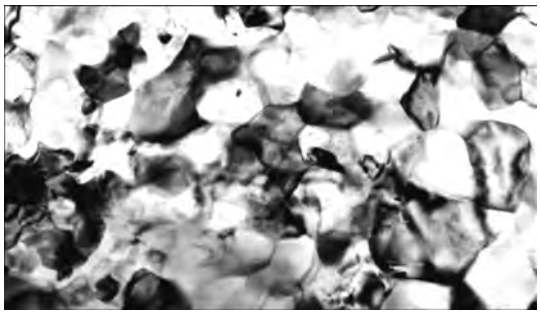


Рис. 12. Трансэмиссионная электронная микроскопия микроструктуры вакуумно-дугового Ti/Al покрытия; ×72000

более сильному притягиванию отрицательно заряженной подложкой ионов титана, что способствует изменению соотношения титана и алюминия в покрытии.

Измерения микротвердости конденсатов титанового сплава Ti–Al толщиной 140 мкм (время осаждения 60 мин) на приборе ПМТ-3М при нагрузке 2 Н показали, что твердость конденсированных слоев, сформированных при электрическом смещении –50 и –180 В, составляет соответственно 5,1 и 5,5 ГПа. Аналогичные измерения микротвердости на приборе «Микрон-Гамма» с записью кривых нагружения и последующей разгрузки показали, что титановый конденсат, осажденный на подложке с потенциалом –50 В, имеет микротвердость 5,06 ГПа и модуль упругости 140 ГПа. Полученные данные находятся в соответствии с литературными, свидетельствующими о том, что уменьшение содержания алюминия от 36 до 20 % вызывает повышение твердости [4].

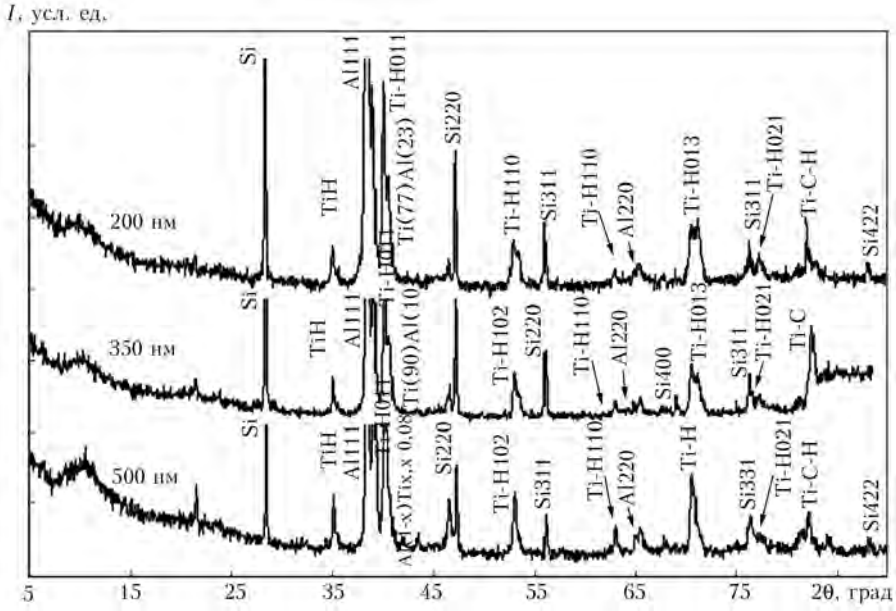


Рис. 13. 2θ рентгенографические развертки многослойных Ti/Al конденсатов с различными значениями толщины субслоев; I — интенсивность

Большой научный и практический интерес представляют многослойные композиции. Электронно-микроскопические исследования многослойных конденсатов системы Ti/Al (общая толщина 40…60 мкм) показали, что в случае толщины чередующихся субслоев 500 и 350 нм при конденсации формируются слои с модулированной структурой (рис. 11). Однако при толщине субслоев 200 нм и меньше обнаружена их фрагментация, связанная с большими внутренними напряжениями в такой композиции.

Трансмиссионные электронно-микроскопические исследования многослойных конденсатов системы Ti/Al в продольном сечении зафиксировали наличие мелкозернистой структуры с размером зерна 0,3…0,5 и 0,1…0,3 нм в зависимости от толщины субслоев (рис. 12).

Рентгенографический анализ многослойных конденсатов установил, что дифрактограммы содержат пики как титана, так и алюминия. Кремниевые линии использовали в качестве реперных (рис. 13). Помимо линий чистых металлов, присутствуют также пики интерметаллидов Ti_xAl_{1-x}. Уменьшение периода модуляции способствует образованию интерметаллидов различного состава на межслойных поверхностях раздела. Зафиксированное удвоение пиков титана и алюминия свидетельствует об образовании твердых растворов алюминия в гексагональном титане и титана в алюминии. Низкий и широкий пики на малых градусах отражают наличие в этих композициях рентгеноаморфной фазы с размером кристаллитов в несколько нанометров.

Измерения микротвердости многослойных Ti/Al конденсатов показали, что уменьшение толщины субслоев от 500 до 350 нм вызывает рост твердости от 3,04 до 3,70 ГПа. Однако дальнейшее уменьшение толщины субслоев (до 200 нм) приводит к снижению твердости до 2,93 ГПа, что объясняется фрагментацией субслоев.

Выводы

1. Показано, что вакуумно-дуговая технология осаждения позволяет получать покрытия с разными типами металлических структур и различными свойствами, включая чистые металлы, сплавы и многослойные композиции.

2. Определено, что высокая степень ионизации создаваемых в этом случае плазменных потоков в сочетании с подачей отрицательного потенциала на подложки дает возможность управлять химическим составом и физико-механическими свойствами конденсатов в широком диапазоне.

3. Установлено, что варьирование периода модуляции в многослойных композициях ведет к изменению соотношения фазового состава, микроструктуры и твердости таких покрытий.

1. *Jiangwei R, Li Yajiang, Feng Tao.* Microstructure characteristics in the interface zone of Ti/Al diffusion bonding // Materials Letters 56. — 2002. — November. — P. 647–652.
2. *Ramos A. S., Calinas R., Vieira M. T.* The formation of γ-TiAl from Ti/Al multilayers with different periods // Surface and Coatings Technology. — 2006. — № 200. — P. 6196–6200.
3. *PalDey S., Deevi S. C., Alford T. L.* Cathodic arc deposited thin film coatings based on TiAl intermetallics // Intermetallics. — 2004. — № 12. — P. 985–991.
4. *Еременко В. Н.* Титан и его сплавы. 2-е изд. — Киев: Академия наук УССР, 1960. — 500 с.

Ин-т пробл. материаловед. им. И. Н. Францевича
НАН Украины, Киев
ООО «РИАЛ», Запорожье
Поступила 13.02.2009

УДК 669.15.621:541.121

ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ОСНОВНОСТИ ШЛАКОВОГО РАСПЛАВА В СИСТЕМЕ ГАЗ–ШЛАК–МЕТАЛЛ

В. В. Лакомский, Г. М. Григоренко

Рассмотрены различные подходы к оценке основности шлаковых расплавов. Указано, что основность характеризует не столько соотношение концентрации основных и кислотных оксидов в шлаках, сколько окислительный потенциал системы.

Different approaches to the evaluation of basicity of slag melts are considered. It is shown that the basicity characterizes not so much the ratio of concentration of basic and acid oxides in slags as the oxidizing potential of system.

Ключевые слова: *основность; шлак; окисленность; металл*

Шлаки присутствуют во многих металлургических и сварочных (микрометаллургических) процессах и предназначены для осуществления различных технологических функций. В одних процессах они предохраняют металлическую ванну от тепловых потерь при контакте с атмосферой и защищают металл от взаимодействия с компонентами атмосферы [1]; в других — являются средой, адсорбирующей вредные примеси (серу, фосфор, неметаллические включения и т. п.), удаляемые из металла [2, 3].

В некоторых случаях шлаки служат источником тепла, необходимого для нагрева и расплавления металла [4]. Указанные функции шлаков можно совместить в некоторых металлургических процессах или расширить их набор за счет других требований, предъявляемых к шлаковым расплавам.

Традиционно шлаками называют оксидные расплавы, образующиеся в результате протекания обменных реакций при производстве металла. Состав шлаков определяется составом расплавляемого металла и шихтовых компонентов и может в ходе плавки меняться в зависимости от условий процесса и типа добавляемых компонентов.

В первичных металлургических агрегатах каждому периоду плавки соответствуют шлаки различного состава. Достичь такого изменения можно в результате корректировки во время плавки состава шлаков путем удаления части шлакового расплава из плавильного пространства или/и добавления других шихтовых шлакообразующих компонентов.

Для осуществления внепечной обработки, сварки или электрошлакового процесса необходимы шлаки с заранее установленными концентрациями комплектующих соединений, названные при их создании синтетическими шлаками или флюсами. Эти шлаки имеют в своем составе требуемый набор компонентов, включающий, кроме оксидов, фториды щелочноземельных (в некоторых случаях и щелочных) металлов. Оксиды шлаков могут быть как основными, так и кислотными. Соотношение их количества определяет свойства расплавленных шлаков. Для упрощения оценки указанного соотношения используют такой параметр, как основность. Подходов к оценке основности несколько.

Первый (самый простой) основан на соотношении концентраций оксидов кальция и кремния. Дальнейшее изучение строения шлаковых расплавов привело к тому, что основность определяли сооотношением практически всех оксидов, содержащихся в расплаве. При этом концентрацию амфотерных оксидов корректировали множителями, определяющими степень основности или кислотности данного оксида. Таким образом, получались сложные формулы, в которых определялось влияние каждого оксида на основность расплава, а в результате — и на его свойства, в частности формула расчета основности, рекомендованная Международным институтом сварки:

$$B = \frac{CaO + MgO + BaO + SrO + K_2O}{SiO_2 + 0{,}5(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)} + \frac{Na_2O + CaF_2 + 0{,}5(MnO + FeO)}{SiO_2 + 0{,}5(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)}.$$

Дальнейшая оценка основности способствовала созданию такого понятия, как оптическая основность λ_i (или теоретическая оптическая основность), которое сводится к оценке энергетического состояния анионов шлакового расплава либо выражается следующим образом:

© В. В. ЛАКОМСКИЙ, Г. М. ГРИГОРЕНКО, 2009

$$\lambda_1 = \frac{0{,}745}{D + 0{,}6}; \qquad D = \frac{aZ}{r^2},$$

де a — параметр аниона; Z — заряд аниона; r — среднее расстояние между анионом и катионом: либо такой формулой:

$$\lambda = \frac{1}{1{,}36\,(\chi - 0{,}26)}, \qquad (3)$$

где χ — электроотрицательность по Л. Полингу [5, 6]

При указанной оценке основности определяли не соотношение массовых долей стехиометрических соединений оксидов, присутствующих в шлаках, а соотношение энергетических состояний анионов, имеющихся в шлаковых расплавах. Таким образом, при оценке основности шлаков исходили из соотношения концентраций основных и кислотных оксидов в них.

Однако подход к оценке основности шлаков изменился из-за современных представлений о строении шлаковых расплавов, согласно которым главными поставщиками ионов в шлаковый расплав являются основные, а не кислотные катионы, участвующие преимущественно в создании комплексных, довольно сложных, конгломератных соединений, присутствующих в расплаве оксидов [7]. Эти катионы являются не только поставщиками свободного кислорода в расплав, а и возможными потребителями других анионов в этом же расплаве [8], например при десульфурации или дефосфорации [6, 9, 10], азотации или деазотации металла. Таким образом, оценка основности шлакового расплава основывалась на оценке соотношения возможностей основных и кислотных свойств шлаков.

В современных шлаках, используемых в металлургических процессах, присутствуют не только оксиды, но и галогениды (в частности фториды щелочноземельных элементов, например CaF_2). В последних, в отличие от оксидов, где химические связи между элементами являются ковалентными, они более насыщены и квалифицируются как ионные, вследствие чего могут легко разрушаться с формированием свободных анионов и катионов. Поэтому в ходе пирометаллургических процессов создаются термодинамические условия, способствующие ионизации не только галогенидных соединений, но и оксидных. Происходят данные процессы благодаря тому, что присутствие галогенидных соединений в жидких перегретых шлаках способствует перераспределению соотношений концентрации оксидных составляющих шлаковых расплавов [10].

Определяющим для всех металлургических взаимодействий, происходящих в ходе пирометаллургических процессов (плавка металла или сварка его), является их описание не термодинамическими, а кинетическими зависимостями, поскольку в указанных процессах не достигаются условия термодинамического равновесия, определяющего соблюдение равенства трех параметров — температуры, давления и химического потенциала [10].

Из всех указанных параметров не успевает установиться одинаковым для всей системы за время технологического цикла химический потенциал. Давление, вследствие законов гидродинамики и благодаря им [9], в металлургической системе устанавливается быстро. Равенство температуры и химического потенциала достигается по одинаковым законам, хотя при этом скорость выравнивания температуры выше, чем у химического потенциала [10]. Связано это не только с выравниванием химического содержания данного элемента в соответствии со стехиометрическим составом, а и с установлением его фиксированных химических связей с соседствующими элементами или готовыми для связей с ним соединениями (комплексами). В современных шлаковых системах такое равновесие трудно достижимо. Поэтому можно утверждать, что оценка основности шлакового расплава есть ни что иное, как определение окислительной способности этого расплава.

Изложенное выше позволяет предположить, что понятие основность шлака требуется для прогнозирования возможных взаимодействий в тройной системе газ–шлак–металл, присутствующих практически во всех пирометаллургических процессах и происходящих не только в шлаке, но и во всей системе. Таким образом, именно свойства шлака, а не металла или газа, являются определяющими для всей системы.

Данное сообщение предваряет последующие статьи, в которых будет рассмотрено влияние основности шлаковых расплавов на физико-химические процессы, происходящие в тройных системах газ–шлак–металл.

1. *Явойский В. И.* Теория процессов производства стали. — М.: Металлургия, 1967. — 518 с.
2. *Поляков А. Ю.* Теоретические основы рафинирования сталеплавильной ванны. — М.: Наука, 1975. — 208 с.
3. *Медовар Б. И., Цыкуленко А. К., Шевцов В. Л.* Металлургия электрошлакового процесса. — Киев: Наук. думка, 1986 — 248 с.
4. *Корнфельд М.* Упругость и прочность жидкостей. — М.; Л.: Гостехиздат, 1951 — 107 с.
5. *Полинг Л.* Природа химической связи. — М.; Л.: Госхимиздат, 1947. — 440 с.
6. *Wrampelmeyer J.-C., Dimitrov S., Janke D.* Dephosphorisation equilibria // Steel Research. — 1990. — № 1. — P. 1–7.
7. *Жмойдин Г. И., Чаттерджи А. К.* Шлаки для рафинирования металла. Динамика свойств системы CaO-Al_2O_3-CaF_2. — М.: Металлургия, 1986. — 296 с.
8. *Евтюхина И. А., Коршикова Н. Г., Кунин Л. Л.* Измерение относительной активности иона кислорода для оценки кислотно-основных свойств шлаков // Свойства шлаковых расплавов. — М.: Наука, 1970 — С. 107–120.
9. *Лакомский В. В.* Об одновременной десульфурации и дефосфорации стали добавками Na_2CO_3 // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1991. — № 3. — С. 23–25.
10. *Григорян В. А., Белянчиков Л. Н., Стомахин А. Я.* Теоретические основы электросталеплавильных процессов. — М.: Металлургия, 1986. — 256 с.

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

Поступила 22.05.2009

УДК 621.365.5:533.9

ПЛАЗМЕННЫЕ ПРИСТАВКИ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧАХ

В. Л. Найдек, В. Н. Костяков, А. А. Волошин

Рассмотрены особенности плавки металлов в плазменно-индукционных печах, приведены технические характеристики плазменных приставок к индукционным печам. Показано, что дополнительный нагрев металла в индукционных печах позволяет повысить скорость плавки и качество металла, а также снизить энергоемкость процесса.

Peculiarities of melting of metals in plasma-induction furnaces are considered, the technical characteristics of plasma attachments to induction furnaces are given. It is shown that the auxiliary heating of metal in induction furnaces allows increasing the melting speed and quality of metal and also decreasing the power intensity of the process.

Ключевые слова: *индукционная печь; плазма; плавка; металл; качество; шихта; дуга; плазменная приставка*

В машиностроении для изготовления отливок из черных и цветных металлов широко применяют индукционные печи, позволяющие проводить термовременную обработку, рафинирование, легирование и модифицирование металла в печи. Для них характерна высокая технологическая гибкость, благодаря которой обеспечивается получение металла заданного химического состава, выпуск жидкого металла произвольными порциями, длительное его хранение без изменения свойств, использование шихты малой объемной массы.

К достоинствам индукционных печей следует отнести также наиболее благоприятные санитарно-гигиенические условия труда и существенное оздоровление воздушного бассейна вследствие резкого уменьшения промышленных выбросов [1].

В последние годы созданы более совершенные индукционные печи [2, 3]. Однако по-прежнему их технологические возможности весьма ограничены, поскольку не позволяют вести активный металлургический процесс плавки. Малая вместимость индукционных печей исключает также применение в технологическом цикле производства отливок традиционных способов внепечной обработки металла, столь широко используемых в металлургии.

Таким образом, требуется совершенствование технологии и интенсификация процесса плавки в индукционных печах, создание новых высокопроизводительных плавильных агрегатов на базе индукционных печей.

Повышение эффективности работы индукционных печей связано с комплексом мероприятий по организации рациональной технологии и увеличению их КПД.

Анализ работы индукционных печей показал их неэффективность в режиме подогрева шихты до плавления, а также низкие значения КПД [4].

Среди всех известных способов интенсификации плавки в индукционных печах наиболее эффективным является дополнительный нагрев металла плазменной дугой постоянного или переменного тока. Такой способ позволяет не только интенсифицировать процесс плавки металла, но и повысить его качество [5].

Физическая сущность дополнительного нагрева металла плазменной дугой в индукционных печах, влияние его на основные показатели работы печей и характер протекания металлургических процессов в металлической ванне подробно рассмотрены в работе [6].

При комбинированном плазменно-индукционном нагреве расплавление металла осуществляется путем прямого нагрева шихты индуктором и косвенного нагрева металла плазменной дугой.

Коэффициент интенсификации плавки в индукционной печи с дополнительным нагревом металла плазменной дугой может быть выражен следующим образом [4]:

© В. Л. НАЙДЕК, В. Н. КОСТЯКОВ, А. А. ВОЛОШИН, 2009

Технические характеристики плазменных приставок

Тип печи	Вместимость тигля	Подводимая к плазмотрону мощность	Ток, А	Напряжение, В	Экономия электроэнергии на 1 т жидкого металла, кВт·ч
ИСТ	0,16...0,25	50	1000	230	400
	0,4...0,5	70	1000	230	350
	1,0	150	1600	300	270
ИЧТ	6,0	100	1250	230	100
	10,0	100	1250	230	100

Примечание. Использован постоянный ток; рабочий газ в ИСТ — аргон, в ИЧТ — воздух.

$$K = I + \frac{P_{пл}}{P_{и}} \cdot \frac{\eta_{пл}}{\eta_{и}}.$$

Из этого уравнения следует, что значение коэффициента интенсификации плавки в индукционной печи при комбинированном нагреве зависит от соотношения мощностей $P_{пл}$, $P_{и}$ и КПД плазмотрона $\eta_{пл}$ и индуктора $\eta_{и}$.

Расчетные и экспериментальные данные показали, что коэффициент интенсификации плавки с увеличением термического КПД индукционной печи уменьшается. Поэтому для индукционных печей большой вместимости, работающих с высоким значением термического КПД, эффективность нагрева металла плазменной дугой снижается. Однако не представляется возможным учесть особенности нагрева металла плазменной дугой, для которой условия теплопередачи улучшаются с увеличением геометрических размеров плавильной ванны.

В реальных условиях интенсификации процесса плавки в индукционной печи достигают за счет эффективного использования энергии плазменной дуги в период расплавления шихты, когда дуга практически полностью экранируется кусками шихты и, следовательно, вся выделенная мощность в столбе дуги расходуется на расплавление металла [7]. При этом горячий газ довольно хорошо омывает кусковую шихту, а большой градиент температуры обеспечивает высокую скорость теплопередачи к металлу. В этот период конвективный теплообмен в тигле плазменно-индукционной печи аналогичен таковому в шахтных печах, характеризующихся большой поверхностью нагрева.

Некоторое различие состоит в том, что в плазменно-индукционных печах не достигается равномерное распределение плазмообразующего газа по сечению плавильного тигля, и на отдельных участках процесс теплопередачи к металлической шихте интенсифицируется за счет выделения дополнительного тепла вследствие рекомбинации молекул газа. В результате на дне тигля уже в начальный период плавки образуется жидкое «болото», повышающее эффективность работы индуктора. После расплавления шихты интенсивность теплопередачи от плазменной дуги к жидкой ванне снижается.

Плазменно-индукционные печи являются прогрессивными плавильными агрегатами, предназначенными для плавки черных и цветных металлов и сплавов. С металлургической точки зрения эти печи имеют определенные преимущества, по сравнению с индукционными: возможность ведения активного металлургического процесса плавки, незначительный угар легирующих элементов, высокая скорость плавки, более низкая энергоемкость плавки, равномерное распределение температуры в объеме тигля и др.

Благодаря таким преимуществам плазменно-индукционные печи могут использоваться для выплавки практически всех марок стали, чугуна, алюминиевых и медных сплавов. Кроме того, в них можно выполнять жидкофазное восстановление хрома, никеля, ванадия, молибдена и других элементов из оксидных расплавов металлургических шлаков и шламов, окалины, золы ТЕС, гальваношламов. Это обеспечивает существенное снижение стоимости выплавляемого металла.

Многолетний опыт ФТИМС НАН Украины по созданию оборудования и технологии плавки металлов с применением плазменного нагрева позволил создать плазменные приставки к индукционным печам различной вместимости (таблица).

Данные таблицы показывают, что с увеличением вместимости индукционных печей эффективность нагрева металла снижается, о чем свидетельствуют результаты экономии электроэнергии. Так, для печей малой вместимости экономия энергии составля-

Плазменно-индукционная печь вместимостью 1,5 т

ет 270…400 кВт·ч/т, а с увеличением вместимости удельный расход электроэнергии снижается до 100 кВт·ч/т.

Однако эффективность дополнительного нагрева металла плазменной дугой в индукционной печи не уменьшается, поскольку металлургические возможности этих печей довольно высокие. Так, например, от вида шихты при выплавке стали не зависит качество выплавленного металла [8]. Кроме того, рафинирующее воздействие плазменной дуги на металл в процессе плавки влияет на поведение неметаллических включений. В выплавленном металле они измельчаются и равномерно распределяются в объеме отливки. Это обусловливает повышение пластических характеристик и ударной вязкости сплавов. При выплавке чугуна уменьшение вредных примесей, например серы, способствует сокращению расхода модифицирующих добавок в несколько раз.

По инициативе и при участии ФТИМС НАН Украины организовано производство плазменно-индукционных печей малой вместимости на ПО «ДагЗЭТО» г. Избербаш (Россия). Однако распад СССР затормозил широкое внедрение на предприятиях машиностроительного комплекса прогрессивной технологии плазменно-индукционной плавки.

Следует отметить, что на предприятиях машиностроительного комплекса Украины не проявили интерес к этой прогрессивной технологии плавки, преимущества которой в условиях энергетического кризиса очевидны, в отличие от предприятий бурно развивающегося Вьетнама.

В 2008 г. на одном из предприятий Вьетнама введена в эксплуатацию плазменно-индукционная печь вместимостью 1,5 т (рисунок), для которой плазменную приставку разработали и изготовили во ФТИМС НАН Украины.

Таким образом, в условиях кризиса в Украине одним из направлений экономии энергоресурсов в литейном производстве, характеризующимся большой энергоемкостью на этапе приготовления сплавов, является дооборудование индукционных печей плазменными приставками. Это позволит не только сократить энергозатраты, но и внедрить новые ресурсосберегающие технологии.

1. *Современный* уровень индукционных печей для плавки чугуна / М. Я. Свистунова, В. Г. Ладожский, А. А. Простяков, В. С. Шумихин. — Киев, 1980. — 39 с. (Препр. / АН УССР. Ин-т проблем литья, № 11).
2. *Лузгин В. И.* Индукционные системы и методы среднечастотной плавки черных металлов // Металлург. — 2008. — № 5. — С. 38–43.
3. *Лузгин В. И., Петров А. Ю.* Современные технологии переработки лома и цветных металлов // Металлургия машиностроения. — 2008. — № 1. — С. 6–11.
4. *Интенсификация* процесса плавки и рафинирования металла в индукционных печах / В. А. Ефимов, Г. П. Борисов, В. Н. Костяков, А. И. Шевченко // Технология и организация производства. — 1969. — № 11. — С. 8–10.
5. *Костяков В. Н.* Интенсификация плавки в индукционных плавильных печах // Литейн. пр-во. — 1972. — № 8. — С. 41–42.
6. *Костяков В. Н.* Плазменно-индукционная плавка. — Киев: Наук. думка, 1991. — 208 с.
7. *Лакомский В. И., Костяков В. Н.* Перспективы применения плазменного нагрева при выплавке высококачественных сталей и сплавов в плавильных печах // Рафинирующие переплавы. — 1974. — Вып. 1. — С. 212–224.
8. *Полетаев Е. Б.* Выплавка шихтовой заготовки из нержавеющей стали 09Х16Н4БА в плазменно-индукционной печи ИСТП-0,16 // Прогрессивные способы плавки литейных сплавов: Сб. науч. тр. — Киев: ИПЛ АН УССР, 1987. — С. 23–26.

Физико-технолог. ин-т металлов и сплавов
НАН Украины, Киев

Поступила 11.03.2009

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «Ti-2009 в СНГ»

17-20 мая 2009 г. в Одессе (Украина) состоялась организованная межгосударственной ассоциацией «Титан» традиционная ежегодная международная конференция «Ti в СНГ». Несмотря на мировой экономический кризис, как и в предыдущие годы, в конференции приняли участие около 250 делегатов из 13 стран мира, в том числе из Украины, России, Беларуси, Таджикистана, США, Германии, Италии, Японии, Китая и др. На конференции с докладами выступили ученые и специалисты в области титана из ведущих научно-исследовательских организаций и промышленных предприятий Украины, России, и других стран: Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Института металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Физико-механического института им. Г. В. Карпенко НАН Украины, Института геологических наук НАН Украины, Государственного научно-исследовательского и проектного института титана, Запорожской государственной инженерной академии, КП «Запорожский титано-магниевый комбинат», АНТК им. О. К. Антонова, ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», ФГУП «Всероссийский институт авиационных материалов», ОАО «Всероссийский институт легких сплавов», «МАТИ» — Российского государственного технологического университета им. К. Э. Циолковского, Уральского государственного технического университета «УПИ», ОАО «Корпорация «ВСМПО-АВИСМА», МВТУ им. Н. Н. Баумана, ОАО «Чепецкий механический завод», ОАО «Калужский турбинный завод», ОАО «Уралредмет» и др. Всего представлено более 100 докладов по трем таким секциям:

- инновационные технологии; применение титана;
- сырье, металлургия;
- металловедение и технологии титановых сплавов.

От ИЭС им. Е. О. Патона представлены доклады, посвященные выплавке способом индукционной плавки с формированием в секционном охлаждаемом кристаллизаторе слитков алюминида титана, исследованию прессовой сварки алюминида титана с титановыми сплавами, ремонтной аргонодуговой наплавке на изделия из титанового сплава ВТ22 проволокой СП15. Особый интерес участников конференции вызвал доклад, посвященный получению способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью крупнотоннажных слитков титановых сплавов для атомного машиностроения.

Традиционно большое количество докладов на конференции представили сотрудники Института металлофизики им. Г. В. Курдюмова. В них они продемонстрировали последние достижения в области синтеза высоколегированных титановых сплавов, осуществляемого способом порошковой металлургии, и их термомеханической обработки.

Значительное количество докладов поступило от ученых из «МАТИ» — Российского государственного технологического университета им. К. Э. Циолковского, где ведутся интенсивные исследования в области материаловедения титана и сплавов, в том числе с целью его применения в медицине.

Большое внимание на конференции уделили вопросам развития сырьевой базы титановой отрасли в странах СНГ. Согласно докладам представителей Института геологических наук, в Украине имеются наибольшие в мире запасы титановых руд, пригодных к промышленному освоению с максимальной экономической эффективностью. Несмотря на значительные усилия, предпринимаемые в России в течение последних 18 лет по развитию собственной минерально-сырьевой базы, к практическому освоению подготовлено только одно месторождение титановых руд на Дальнем Востоке.

Продолжается совершенствование технологии производства губчатого титана на предприятиях Украины и России. На КП «Запорожский титано-магниевый комбинат» продолжен ввод в эксплуатацию новых аппаратов магнийтермического получения губчатого титана с массой блоков до 4 т. Ведутся работы по разработке технологии легирования губчатого титана кислородом в процессе восстановления. В 2008 г. на КП «ЗТМК» введена в эксплуатацию электронно-лучевая установка с промежуточной емкостью для производства титановых слитков и слябов массой до 5 т. В России на Соликамском магниевом заводе запущен в эксплуатацию новый цех по производству 5000 т губчатого титана в год.

В связи с мировым экономическим кризисом в 2008 г. рост объемов производства титана практически прекратился, хотя производственные мощности по выпуску губчатого титана, слитков и проката продолжали увеличиваться. Так, например, в Китае в 2008 г. выпущено около 50 тыс. т губчатого титана

(в 2007 г. — 45 тыс. т), в то время как производственные мощности по его выпуску составили 71 тыс.т (в 2007 г. — 58 тыс. т).

Впервые в практике международных конференций «Ti в СНГ» проведено заседание дискуссионного клуба «Рынок титана в условиях экономического кризиса». В ходе дискуссии выступили А. В. Александров (ЗАО «Межгосударственная ассоциация «Титан»), А. Н. Строшков (ОАО «Корпорация «ВСМПО-АВИСМА»), A. Cappelletti (Cap. Co. S.r.l., Италия), T. Nishimura (NTC «Corporation for titanium», Япония) и многие другие специалисты, работающие на рынке титана. Как отмечали докладчики, в течение 60 лет существования титановой индустрии происходит уже четвертый кризис сбыта титановой продукции. Каждый кризис заканчивался новым всплеском спроса на титан и изделий из него. Поэтому общее мнение всех выступавших заключалось в том, что титановую отрасль ожидают новые свершения, а для их ускорения необходимо работать над снижением себестоимости производства титана и изделий из него, в том числе за счет применения новых прогрессивных технологий.

В заключение хотелось бы отметить высокий уровень проведения конференции и выразить благодарность ее организаторам в лице ЗАО «Межгосударственная организация «Титан» и ее председателя А. В. Александрова.

С. В. Ахонин

V ВСЕУКРАИНСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

27–29 мая 2009 г. в Ворзеле на базе кардиологического санатория «Ворзель» прошла юбилейная V всеукраинская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии», в этом году посвященная 75-летию основания ИЭС им. Е.О. Патона.

Для участия в конференции заявлено 211 докладов молодых ученых и специалистов (в том числе 94 от сотрудников ИЭС), представивших 36 научных организаций, учебных заведений и предприятий Винницы, Луганска, Днепропетровска, Запорожья, Донецка, Днепродзержинска, Одессы, Николаева, Мариуполя, Херсона, Ивано-Франковска, Львова, Харькова, Чернигова, Киева и Москвы. К началу проведения конференции в ИЭС им. Е. О. Патона изданы сборник тезисов и программа работы. В работе конференции участвовали более 100 человек. Конференция проходила 3 дня в режиме пленарных заседаний, на которых заслушали 85 докладов.

Открыл конференцию председатель оргкомитета, ученый секретарь ИЭС им. Е. О. Патона, доктор технических наук Л. С. Киреев, зачитавший обращение Б. Е. Патона к молодым ученым и специалистам.

Представленные на конференции доклады охватывали следующие направления:

- прогрессивные технологии сварки и соединения материалов;
- прочность, надежность и долговечность сварных конструкций;
- технологии наплавления, нанесения покрытий и обработки поверхности;
- процессы специальной электрометаллургии;
- новые конструкционные и функциональные материалы;

- техническая диагностика и неразрушающий контроль;
- фундаментальные исследования физико-химических процессов (термодинамика, кинетика, микроструктура, фазовые превращения, электронная структура, свойства);
- математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах.
- математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах.

Высокая честь выступить с первым докладом была оказана участнику всех пяти конференций, сотруднику отдела № 22 Е. В. Половецкому.

Представленные доклады были посвящены практически всем видам сварки: ударной (Е. В. Половецкий), плазменно-дуговой (А. А. Гринюк), дуговой точечной (П. В. Гончаров), лазерной (О. В. Сиора, А. Н. Палагеша, М. М. Аль-Шара), контактно-стыковой (К. В. Гущин), трением (И. В. Зяхор),

гибридной лазерно-дуговой (В. Ю. Хаскин), плавящимся электродом (И. В. Березин), электронно-лучевой (Р. В. Мищенко), диффузионной (В. Е. Федорчук, Л. В. Петрушинец), прессовой (А. В. Ясинский), микроимпульсной (Н. А. Грановская) и др.

Работы сотрудников ИЭС им. Е. О. Патона освещали как обеспечение технологических условий сварки, наплавки, обработки деталей и конструкций, так и исследование фундаментальных процессов, происходящих при этих условиях.

Много работ касалось проблем создания материалов с новыми свойствами. Так, сотрудники Центра электронно-лучевых технологий (Е. В. Фесюн, В. М. Тараненко, К. В. Ляпина, Т. В. Мельниченко, А. И. Устинов) представили исследования вакуумных конденсатов (галогенидов щелочных металлов, систем Fe–Cu, Ti–Al, Al–Cu).

Представители Винницкого Национального технического университета (Д. В. Бакалец, Ю. Л. Хлевна, В. И. Шенфельд) рассказали о возможности использовать для упрочнения и восстановления поверхностных слоев чугунов углеродную ткань или углеродные волокна.

Сотрудники Института проблем прочности исследовали сплавы Ti–Sn–Ga (С. А. Бобырь), Ti–Si–Zr–Sn и Ti–Si–B–Sn (И. Д. Горная), Ti–36Al–Y (А. В. Герда), Fe–Mo–B и Ni–Mo–B (С. В. Уткин), Ga–Cd (Д. С. Каниболоцкий), а Института металлофизики — сплавы Ti–Si (С. В. Ткаченко), Zr18Nb (П. Э. Рудой), Zr–Nb–Ti (Н. И. Хрипта).

Многие докладчики уделили внимание математическим методам расчета термонапряженного состояния, описанию поведения сварочной дуги и жидкой ванны, математическому моделированию свойств сварных соединений различных материалов при различных видах сварки.

Так, в Николаевском Национальном университете кораблестроения используют методы математического моделирования напряженного состояния и пластических деформаций при диффузионной сварке (В. В. Квасницкий), рассчитывают напряженно-деформированное состояние при соединении металлокерамических и неметаллических деталей путем диффузионной сварки и пайки (А. В. Лабарткава), моделируют эффективность повышения производительности сварки при помощи дополнительного использования нетокопроводной проволоки (В. Г. Лебедев).

Значительное внимание на конференции уделили докладу «Физическое моделирование термодеформационных состояний металлов средствами комплекса «Gleeble-3800» (В. В. Жуков), поскольку он является одной из установок, входящих в Центр коллективного пользования приборами, созданного в ИЭС на базе отдела физико-химических исследований материалов.

В своих докладах сотрудники ИЭС им. Е. О. Патона рассматривали порошки и покрытия на их основе, состав покрытий и способы их нанесения. Авторы исследовали самофлюсующиеся (А.Хуткий), стеклокерамические и металлокерамические покрытия (А. В. Чорный), гидроксиапатит (С. Г. Войнарович), ультрадисперсные карбиды (В. А. Жданов), суспензии TiO_2 (Е. К. Кузьмич-Янчук), Al–Cu–Fe–Ti–Cr–Si (А. Ю. Туник) порошки.

Большой интерес вызвали доклады, посвященные сварке живых тканей. Представлено два доклада (А. В. Лебедев, А. Г. Дубко, Т. А. Фесюк) по разработке технологии, оборудования и инструментов для сварки кровеносных сосудов и контактной электросварке мягких живых тканей. Показанный авторами ролик вызвал бурную реакцию зала.

Ряд докладов посвящен обеспечению безопасности в зоне сварки (А. Н. Безушко, А. Н. Тимошенко, А. А. Лукьяненко). Продемонстрирована особая опасность сварочных аэрозолей, в состав которых входят оксиды хрома (шестивалентного) и марганца (четырехвалентного), проведена их классификация по степени опасности для человека.

Некоторые докладчики представили материалы будущих кандидатских (Д. Д. Кункин, С. В. Уткин) и докторских (В. Ю. Хаскин, И. В. Зяхорь) диссертаций.

29 мая состоялось торжественное закрытие конференции, на котором вручали премии за лучшие доклады. I премия присуждена Я. И. Матвиенко (ИЭС им. Е.О. Патона) за доклад «Твердофазные превращения при нагревании многослойных Al/Cu фольг, полученных электронно-лучевым осаждением»; II премии удостоены Т. А. Фисюк (ИЭС им. Е. О. Патона) за доклады «Контактная электросварка мягких живых тканей», «Разработка технологии, оборудования и инструментов для сварки кровеносных сосудов в хирургии» и П. В. Токмаков (Институт черной металлургии, г. Днепропетровск) — «Эволюция развития технологии беспрерывной сортовой прокатки с использованием неприводных прокатных клетей»; III премию разделили Д. М. Жиров (ИЭС им. Е. О. Патона) за доклад «Плазменная технология восстановления деталей», И. В. Гайдук (НТУУ «КПИ») за доклад «Разработка методики исследования газолазерной резки с использованием водород-кислородной смеси» и А. С. Гуденко (ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»,

Москва, Россия) за доклад «Исследование причин образования трещин в новых лопатках (состояние поставки), поставленных ОАО «Турбоатом» на блок № 3 Смоленской АЭС».

Оргкомитет благодарит за спонсорскую помощь компанию «Абикор Бинцель ГмбХ», выделившую деньги на премирование участников.

Подводя итоги, хотелось бы отметить благожелательное отношение и всестороннюю помощь в проведении конференции сотрудников кардиологического санатория «Ворзель» и лично главного врача Тамилы Гавриловны Руденко.

Благодарим за оказание технической и организационной помощи следующие отделы ИЭС и их руководителей: НТК «ИЭС им. Е. О. Патона» (В. Н. Проскудин), № 90 (Л. С. Киреев), № 8 (Л. М. Лобанов), № 22 (Г. М. Григоренко). Также хочется отметить большую работу по подготовке и проведению конференции членов оргкомитета С. Г. Войнаровича (отд. № 73), С. Н. Степанюка (отд. № 10), С. Г. Григоренко (отд. № 22), В. В. Савицкого (отд. № 8), А. Б. Лесного (отд. № 34), Е. К. Кузьмича-Янчука (отд. № 73), В. Е. Федорчука (отд. № 7) во главе с председателем — ученым секретарем ИЭС им. Е.О. Патона Л. С. Киреевым.

С. Г. Григоренко

НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ!

Б. В. ДАНИЛЬЧЕНКО — 70 лет!

В апреле 2009 г. исполнилось 70 лет известному специалисту в области износостойкой наплавки, доктору технических наук Борису Васильевичу Данильченко.

После окончания в 1961 г. Киевского политехнического института он начал трудовую деятельность в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, где прошел путь от инженера до заместителя директора.

Научная специализация деятельности Б. В. Данильченко включала разработку материалов для наплавки специальных сталей и сплавов, создание технологии и оборудования для сварки, наплавки, нанесения защитных покрытий. В пределах специализации Б. В. Данильченко лично и в соавторстве с другими сотрудниками разработаны, запатентованы, внедрены в промышленное производство порошковые проволоки и ленты 21 наименования, усовершенствована конструкция и создан магнитострикционный стенд для исследований эрозионного изнашивания наплавленных металлов, создана технология плазменной наплавки, разработаны технологии наплавки ряда быстроизнашиваемых деталей.

Комплекс поисковых, исследовательских, технологических и конструкторских работ, направленных на увеличение ресурса службы рабочих лопаток паровых турбин, нашел отображение в кандидат-ской диссертации, защищенной в 1973 г.

С 1981 по 1986 г. Б. В. Данильченко осуществлял руководство научным отделом «Наплавочные материалы и технологии наплавки металлов», в котором непосредственно принимал участие в исследованиях материалов для наплавки новой системы, легированных ниобием, проводил реконструкцию оборудования для получения гранулированных тугоплавких соединений с принципиальным изменением технологии, вместе с сотрудниками создал технологию наплавки листов порошковыми лентами.

В этот же период велись работы по созданию промышленной базы для развернутого внедрения разработок отдела в народное хозяйство. Проектировался, строился и пускался в эксплуатацию Дубровицкий завод по выпуску материалов для наплавки. Производилось переоснащение и реконструкция Броварского завода «Факел», который стал главным предприятием по производству техники для наплавки и нанесения упрочняющих и защитных покрытий, строились и вводились в эксплуатацию около десяти специализированных цехов и участков для восстановления изношенных деталей, оснащенных техникой, материалами и технологиями, созданными в отделе. Из конструкторских и технологических разработок отдела того времени наиболее значащими для народного хозяйства страны стали станок для наплавки УД-209, производимый серийно на протяжении 12 лет (общее количество составило около 14000 шт.) и порошковая никель-карбидо-хромовая лента с герметичным замком, позволившая широко внедрить в металлургическое производство на-плавку современными материалами проблемных деталей и гарантировать стабильность работы доменных печей.

Комплекс работ по созданию специализированного цеха для упрочнения и восстановления деталей технологического оборудования способами наплавки на горно-металлургическом комбинате в г. Навои отмечен Государственной премией СССР в 1984 г.

В том же году за работы по электроконтактной приварке износостойких материалов Б. В. Данильченко в составе авторского коллектива присуждена премия Совета Министров СССР.

С 1986 до 1998 г. Б. В. Данильченко работал заместителем директора по вопросам науки и промышленного производства Межотраслевого научно-технического комплекса «Институт электросварки им. Е. О. Патона», обеспечивая передачу и постановку на серийное производство его современных разработок, привлекая к выпуску сварочного оборудования новых партнеров (заводы Минстанкопрома, Минэлектротехпрома и Минагропрома).

Почти все разработки комплекса по сварочным тракторам, полуавтоматам, оборудованию по нанесению защитных покрытий и наплавке переданы к серийному производству.

Вполне логичным итогом аналитической и экспериментальной работы по созданию и систематизации износостойких материалов для наплавки системы углерод–хром–железо, прогнозированию продолжительности их работы, поиску, разработке и внедрению новых материалов с полученной за счет мартенсита деформации высокой пластичности стала защита Б. В. Данильченком в 1992 г. докторской диссертации.

С марта 1995 г. Б. В. Данильченко — профессор кафедры ремонтного производства и материаловедения Украинского транспортного университета, он является автором 128 печатных работ, 41 авторского свидетельства СССР и 7 патентов Украины.

С 1998 до 2001 г. (до выхода на пенсию) Б. В. Данильченко работал ведущим научным сотрудником.

Свою активную позицию Б. В. Данильченко сохранил до настоящего времени.

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

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

Редколлегия журнала

«Современная электрометаллургия»

И. С. МАЛАШЕНКО — 70 лет!

Исполнилось 70 лет Игорю Сергеевичу Малашенко — доктору технических наук, известному исследователю в области жаропрочных никелевых сплавов и электронно-лучевых покрытий.

Игорь Сергеевич Малашенко родился 25 апреля 1939 г. в Киеве. После окончания средней школы в 1956 г. поступил в КПИ на металлургический факультет, который закончил в 1961 г., получив квалификацию инженера-металлурга по специальности «Физика металлов».

В августе 1961 г. И. С. Малашенко в качестве инженера, младшего научного сотрудника начал свою трудовую деятельность в ИЭС им. Е. О. Патона, сначала в лаборатории, затем в отделе № 13 чистых металлов под руководством доктора технических наук Б. А. Мовчана.

В Институте электросварки И. С. Малашенко сразу же начал заниматься разработкой технологии получения однофазных и карбидоупрочняемых сплавов ниобия способом электронно-лучевой плавки, а также исследованием их физико-механических свойств для нужд аэрокосмического комплекса. Результаты этих исследований легли в основу кандидатской диссертации, успешно защищенной им в 1967 г.

Следующий этап — разработка свариваемых сплавов молибдена с повышенной низкотемпературной пластичностью (технологичностью). Цель работы заключалась в изучении природы хрупкости и борьбе с межзеренным разрушением молибдена.

Начиная с 1971 г. основное внимание И. С. Малашенко сконцентрировал на применении электронно-лучевой технологии испарения и вакуумной конденсации жаростойких сплавов и оксидных соединений для получения конструкционных материалов и защитных покрытий с особыми служебными свой-ствами для энергомашино- и газотурбостроения.

И. С. Малашенко внес большой вклад в строительство Опытного завода спецэлектрометаллургии при ИЭС им. Патона, созданного для быстрого внедрения в промышленность научных разработок. Институт позволил реализовать новые материаловедческие подходы, направленные на повышение надежности и эффективности изделий газотурбинной техники.

Электронно-лучевая технология нанесения жаростойких и теплозащитных покрытий на лопатки газотурбинных двигателей и энергосиловых установок в течение многих лет была основной в промышленности бывшего СССР. Больших успехов в использовании разработок института достигли НПО «Машпроект», ЮТЗ «Заря» (Минсудпром СССР), КНПО «Труд» (г. Самара), ЛНПО «Сатурн» (г. Москва) (Минавиапром), предприятия Мингазпрома СССР (г. Камышин, г. Москва, г. Брянск).

В 1984 г. вместе с акад. Б. А. Мовчаном и сотрудниками ВИАМа И. С. Малашенко был награжден Ленинской премией в области науки и техники за разработку, создание и внедрение в промышленность новых сплавов.

Дальнейшее развитие этого направления связано с использованием электронно-лучевой технологии нанесения коррозионностойких покрытий на лопатки турбин газокомпрессорных станций Мингазпрома СССР. На Опытном заводе спецэлектрометаллургии ИЭС им. Е. О. Патона создали цех защитных покрытий, где в течение 10 лет было покрыто около 11 тыс. рабочих лопаток импортных и отечественных промышленных турбин, в дальнейшем направленных в промышленную эксплуатацию.

В 1988–1999 гг. И. С. Малашенко возглавлял лабораторию в отделе № 13 ИЭС им. Е. О. Патона.

С 1995 г. в течение пяти лет И. С. Малашенко с сотрудниками работал по контракту с голландской фирмой «Интертурбина», помогая освоению электронно-лучевой технологии вакуумной конденсации защитных покрытий за рубежом.

В связи с реорганизацией и созданием совместного научно-исследовательского центра «Пратт и Уитни-Патон» лабораторию покрытий, руководимую И. С. Малашенко, перевели из Международного центра ЭЛТ ИЭС им. Е. О. Патона в состав «Пратт и Уитни-Патон». Малашенко стал научным консультантом по вопросам покрытий и начал новый цикл работ по ремонтной пайке деталей из никелевых жаропрочных сплавов и восстановлению лопаток ГТД после эксплуатации.

В настоящее время И. С. Малашенко успешно трудится в отделе № 19, где занимается вопросами сварки и ремонта изделий из жаропрочных сплавов.

И. С. Малашенко опубликовал в соавторстве более 200 научных работ. Имеет 15 патентов и два государственных стандарта.

Игорь Сергеевич Малашенко благодаря своей открытости, научной, практической деятельности и богатому опыту снискал уважение и авторитет сотрудников многих научных институтов и организаций НАН Украины и ближнего зарубежья. Он щедро делится своими знаниями с молодыми, всегда готов помочь в решении любых проблем.

Сердечно поздравляем нашего юбиляра, желаем ему крепкого здоровья, бодрости духа, неуемной энергии и вдохновения, еще многие годы трудиться на благо украинской науки. Удачи и благополучия, равновесия и гармонии, наш дорогой Игорь Сергеевич!

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

Редколлегия журнала

«Современная электрометаллургия»