

СОВРЕМЕННАЯ ЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ

www.nas.gov.ua/pwj

4 • 2008

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ УСТАНОВКА УЭ5810 ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КРУПНОГАБАРИТНЫХ СЛИТКОВ ИЗ НЕДРОБЛЕНЫХ БЛОКОВ ГУБЧАТОГО ТИТАНА



ГП «НПЦ «Титан» ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины»
03028, ул. Ракетная, 28, г. Киев, Украина
Тел.: (09044) 524 95 43
Факс: (38044) 524 10 96
E-mail: info@titan-paton.kiev.ua



ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК УКРАИНЫ

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ

№ 4 (93)

2008

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,
Н. П. Тригуб, А. А. Троянский,
В. А. Шаповалов

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

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

Адрес редакции:

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

Редактор:

В. И. Котляр

Электронная верстка:
Д. М. Дяченко,
Л. Н. Герасименко,
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



ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ

ОАО «Украинский графит»

Научно-производственный центр «ТИТАН»

КП «Запорожский титано-магниевый комбинат»

**SOVREMENNAYA
ELEKTROMETALLURGIYA**
(Electrometallurgy Today)

**Nº 4 (93)
2008**

Published since January, 1985

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

Publisher: International Association «Welding»

Is published 4 times a year

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B. E. Paton

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

**THE INTERNATIONAL
EDITORIAL COUNCIL:**

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

Address:

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

Editor:

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

State Registration Certificate
KV 6185 of 31.05.2002

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

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

CONTENTS

Paton Boris Evgenievich — the 90th birthday.....	3
ELECTRON BEAM PROCESSES	
Trigub N. P., Zhuk G. V. Development of advanced technological schemes of production of titanium products at the E. O. Paton Electric Welding Institute	7
Paton B. E., Trigub N. P., Zhuk G. V., Berezos V. A., Erokhin A. G. Prospects of production of titanium pipes for oil and gas industry using the EBCH method.....	10
Zhuk G. V. Modeling of processes of heat transfer in formation of EBCH ingots.....	14
Severin A. Yu., Zhuk G. V., Trigub N. P., Zamkov V. N., Topolsky P. F., Petrichenko I. K. Development and producing titanium alloy with increased heat-resistant characteristics.....	17
Zhuk G. V., Trigub N. P., Fesan A. A. Power characteristics of process of EBCH of titanium alloys.....	20
Ladokhin S. V., Vakhrusheva V. S. Prospects of application of electron beam melting for producing zirconium alloys in Ukraine.....	22
Grechanyuk V. G., Denisenko V. A. Structure and corrosion resistance of composite materials on copper and molybdenum base, produced by electron beam technology method.....	27
ELECTROSLAG TECHNOLOGY	
Makhnenko V. I., Medovar L. B., Saenko V. Ya., Koroleva T. V., Polishko A. A. Mathematical modeling of processes of enlargement of ingots of high-alloy steels and alloys using an electroslag cladding with liquid metal in a current-carrying mould	30
Mitchell A. Electroslag technology for production of aerospace alloys.....	37
PLASMA-ARC TECHNOLOGY	
Burnashev V. R. Plasma-arc remelting of tantalum wastes	44
Kozhemyakin G. N., Lugovoy N. N., Shapovalov V. A., Nikitenko Yu. A., Ivanov O. N., Kolesnikov D. A. Change of structure in annealing quick-hardened alloy of plasma-arc melting	48
GENERAL PROBLEMS OF METALLURGY	
Shapel P., Jardy A., Ablizer D., Pomarin Yu. M., Grigorenko G. M. Deformation of free surface of a metal drop in experiment on electromagnetic levitation.....	50
INFORMATION	
Grigorenko S. G. All-Ukrainian Scientific-Technical Conference of students, post-graduates and young scientists «Welding and related processes and technologies».....	57
Physical-Technological Institute of Metals and Alloys is 50!	58
Thesis for scientific degree	59
Innovation company «ELTERM»	60
Index of articles, published in 2008	61
Index of authors.....	63

Journal «Sovremennaya Elektrometallurgiya»
is published in English under the title

«Advances in Electrometallurgy» by the E. O. Paton Electric Welding Institute.
Concerning publication of articles, subscription and advertising, please,
contact the editorial board

К 90-летию со дня рождения

БОРИС ЕВГЕНЬЕВИЧ ПАТОН

Сотрудники Института электросварки им. Е. О. Патона сердечно поздравляют своего руководителя, выдающегося ученого в области электросварки, металлургии и технологии металлов, с 90-летием со дня рождения и 55-летием его деятельности на посту директора института. Борис Евгеньевич достойно продолжил и развил дело своего отца, основателя Института электросварки — академика Евгения Оскаровича Патона, превратив институт в широко известный в мире научно-технический центр сварки и родственных технологий. Многочисленные технологии, разработанные в институте, нашли широкое применение не только в Украине, но и в разных странах мира.

Много сделал Борис Евгеньевич и для укрепления Национальной академии наук Украины, президентом которой он бессменно является с 1962 г. За прошедшие годы академия получила мощное развитие и стала авторитетным учреждением в самых различных областях современной науки.

Борис Евгеньевич проявил себя как талантливый исследователь и незаурядный организатор, способный управлять исследовательской работой больших коллективов. Для него главное — достижение весомых результатов по наиболее актуальным направлениям исследований и разработок. Он никогда не подчеркивает свою роль и стремится выдвигать талантливых и инициативных сотрудников, увлекая их новыми идеями. Такой стиль работы руководителя создает идеальные условия для продуктивного творчества и здорового климата в коллективе.

Свою научно-техническую деятельность Борис Евгеньевич начал во время Великой Отечественной войны в Институте электросварки, который активно включился в работу для обороны промышленности в Нижнем Тагиле на Уралвагонзаводе, где изготавливались знаменитые танки Т-34. Там он начал исследования автоматического регулирования процессов сварки с непрерывной подачей в зону дуги присадочных материалов. В результате были определены основные требования к статическим и динамическим характеристикам приводов систем автоматического регулирования, положенные в основу при создании первого поколения полуавтоматов, использующих тонкую электродную проволоку в сочетании с защитными флюсами и газами. Позже Борис Евгеньевич занялся изучением физических процессов в дуге, определяющих перенос сварочного материала в расплавленную ванну с целью поиска способов снижения разбрзгивания. Им установлено существенное влияние на этот процесс внешних характеристик источников питания, в частности, показана целесообразность использования для механизированной и автоматической сварки источников с жесткой внешней характеристикой. Эти результаты исследований стали основой для разработки способов сварки в углекислом газе и смесях газов, импульсно-дуговой сварки, которые до настоящего времени доминируют в технологических процессах сварочного производства. Первые работы Б. Е. Патона по сути стали научной основой для создания современной сварочной техники.

Занимаясь сварными мостами, Евгений Оскарович мечтал о способе механизированной сварки швов в различных пространственных положениях. Такой способ сварки с принудительным формированием металла шва был создан при участии Бориса Евгеньевича и первоначально применен на строительстве в г. Киеве моста, носящего имя Евгения Оскаровича Патона.

При выборе тематики для научных исследований Б. Е. Патон часто ориентируется на нужды той или иной отрасли с тем, чтобы результаты работы в дальнейшем

нашли эффективное практическое применение. Так, для изготовления крупногабаритного оборудования для нужд многих отраслей промышленности необходимо было разработать дешевый и достаточно простой способ сварки толстостенных деталей. Выход был найден — создана технология электрошлаковой сварки, которая стала использоваться при изготовлении мощных гидротурбин, прессов, химических реакторов и других уникальных изделий.

Изучение различных способов сварки в качестве объектов управления впервые было определено Борисом Евгеньевичем как одно из наиболее важных направлений в теории сварочных процессов. Кроме проблем управления дуговой и электрошлаковой сваркой, он занимался электротехническими способами совершенствования различных сварочных процессов. Значительный вклад Б. Е. Патон внес в развитие контактной стыковой и точечной сварки, где системы автоматического управления процессом являются ключевыми, определяющими технологические показания и надежность сварочного оборудования для сварки узлов из высокопрочных алюминиевых сплавов, используемых в ракетно-космической технике и авиации, магистральных трубопроводов. Это оборудование применяется в различных отраслях промышленности и не имеет аналогов в мировой практике. Несомненен вклад Б. Е. Патона в изучение физических основ электронно-лучевой, микроплазменной сварки и в создание современного оборудования для этих способов.

Борис Евгеньевич Патон первым предложил применить сварку в космосе. Его идеи, горячо поддержаные С. П. Королевым в середине 1960-х гг., положили начало исследованиям в этой перспективной области современной техники, показали возможность строительства и последующей эксплуатации крупных обитаемых объектов в космосе. Для первого эксперимента по сварке в космосе при непосредственном участии и под руководством Бориса Евгеньевича был создан специальный исследовательский аппарат «Вулкан». В ходе экспериментов в 1969 г. показана перспективность применения электронного луча для сварки, резки, пайки и напыления металлических материалов в космических условиях. Впервые в мире создан и проверен в открытом космосе в 1984 г. космонавтами В. Джанибековым и С. Савицкой ручной универсальный аппарат «Универсал», пригодный для выполнения перечисленных технологических процессов.

По инициативе Бориса Евгеньевича, в институте были развернуты работы по сварке под водой, для чего создана и оборудована специальная лаборатория, в которой при различных давлениях можно производить подводную дуговую сварку. В результате разработаны самозащитная порошковая проволока и полуавтомат для сварки под водой при достаточно высоком давлении.

Борис Евгеньевич придавал большое значение сварке и резке взрывом. По его инициативе и с его участием был создан специальный полигон, на котором можно выполнять сварку и резку металла кумулятивными зарядами, а также организовано производство партий зарядов для сварки и резки в особых условиях.

Невозможно перечислить все направления исследовательской и изобретательской деятельности Бориса Евгеньевича, ставшие основой эффективной работы руководимого им большого научно-технического коллектива.

Из оригинальных исследований последних лет следует отметить работы, связанные с применением сварки в медицине. В первую очередь речь идет о соединении разрезов различных живых мягких тканей вместо сшивания их нитками. Доказано, что электрическая сварка токами высокой частоты в данном случае возможна и имеет преимущества по многим показателям, по сравнению с традиционным способом сшивания. Созданы образцы оборудования с устройствами управления, обеспечивающими обратную связь с процессом образования соединения. Есть все основания полагать, что сварка живых мягких тканей со временем станет применяться как эффективная хирургическая технология.

Б. Е. Патон – генератор новых идей, у него исключительное чутье на все новое, что появляется в смежных областях науки и техники и может быть использовано в сварке. Он был инициатором использования плазмы и лучевых источников нагрева (электронный луч, лазер) для сварки. Благодаря его настойчивой поддержке электронно-лучевая сварка получила в нашей стране широкое применение с первых лет появления этого источника нагрева. Сейчас Борис Евгеньевич уделяет особое внимание поиску новых областей применения лазера и гибридных процессов.

Бориса Евгеньевича по праву можно считать основателем ряда новых специальных металлургических технологий. В конце 1952 г. – начале 1953 г. Б. Е. Патон выдвинул оказавшуюся удивительно продуктивной идею использования сварочных источников нагрева в металлургии с целью придания новых, более высоких значений служебных свойств сталям и сплавам в результате их переплава в водоохлаждаемом кристаллизаторе. Сначала это был электрошлаковый переплав (ЭШП). Металл сварного шва, прошедшего электрошлаковую обработку, как оказалось, характеризуется более высокими физическими свойствами, чем металл, полученный при обычных способах выплавки. Глубокое изучение этого явления увенчалось созданием технологии электрошлаковой металлургии. Созданы специальные цеха производительностью в тысячи тонн металла в год, идущего на изготовление изделий ответственного назначения. Работы Бориса Евгеньевича и его сотрудников в этой области были признаны во многих странах, в том числе США, Германии, Франции, Японии и др. На базе плазменных и электронно-лучевых источников нагрева разработаны металлургические процессы плазменного и электронно-лучевого переплава и рафинирования металлических материалов. Технология и оборудование этих процессов заняли достойное место в современной металлургии новых материалов.

Особо следует отметить процессы электронно-лучевого испарения (атомизации) неорганических веществ в вакууме и последующей конденсации с целью получения материалов с регулируемыми микро- и наноразмерными структурами и соответствующими свойствами. Институт является лидером в этой области новых технологий. Большое внимание в Институте электросварки им. Е. О. Патона уделяется технологиям получения покрытий.

Таким образом, в тематике института появилось два направления: сварка и специальная электрометаллургия. Такой профиль деятельности института создал оптимальные условия для продуктивного обмена и взаимного обогащения идеями сварщиков и металлургов, объединенных общей целью, что обуславливает успешное решение всех новых и новых задач.

В конце 1960-х гг. Борис Евгеньевич возглавил созданный при Президиуме Академии наук СССР Научный совет «Новые процессы получения и обработки металлических материалов».

В связи с окончанием расчетного срока эксплуатации магистральных трубопроводов, реакторов (в том числе атомных), железнодорожных мостов, резервуаров большой емкости и других ответственных конструкций и сооружений особую важность приобрели техническая диагностика и неразрушающие методы контроля качества. Борис Евгеньевич принимает участие в разработке методов и средств для этой цели, а также методик оценки работоспособности ответственных изделий, эксплуатируемых продолжительное время. Он проводит огромную работу по координации программ и мероприятий, направленных на определение технического состояния и продление ресурса объектов повышенной опасности, являясь председателем Межведомственной комиссии по вопросам научно-технической безопасности при Совете Национальной безопасности и обороны Украины и Председателем научно-координационного и экспертного Совета по вопросам ресурса и безопасной эксплуатации конструкций, сооружений и машин при президиуме Национальной академии наук Украины.

Может создаться впечатление, что одному человеку, каким бы талантливым он не был, не под силу решение такого множества проблем, лишь отчасти перечисленных выше. Но это впечатление ошибочно. Бориса Евгеньевича отличает способность в каждой задаче увидеть главное, четко и ясно наметить пути ее решения, увлечь своих сотрудников настолько, насколько она волнует его самого. Он уделяет большое внимание изобретательской деятельности, являясь автором большого количества патентов. Многие изобретения рождались в его кабинете во время совещаний и обсуждения актуальных проблем.

Б. Е. Патон является горячим поборником сохранения и укрепления творческих связей и деловых контактов между учеными и производственниками разных стран, развивает такие новые формы научно-технического сотрудничества, как комплексная реализация международных программ, организация совместных лабораторий и предприятий, широкий обмен информацией. Так, Институт электросварки им. Е. О. Патона является членом Международного института сварки и Европейской сварочной федерации.

Б. Е. Патон – член Международного комитета по научно-технологическому развитию стран СНГ, возглавляет Межгосударственный совет по сварке и родственным технологиям, является председателем Координационного совета межгосударственной программы «Высоконадежный трубопроводный транспорт», членом правления Международной топливно-энергетической ассоциации и членом попечительского совета Международного фонда ядерной безопасности.

О диапазоне международной и общественной деятельности Б. Е. Патона свидетельствует то, что он является Президентом Международной ассоциации академий наук, почетным Президентом Международной инженерной академии, членом Европейской академии и Международной академии технологических наук, почетным членом Международной академии наук образования, индустрии и искусства, Международной академии астронавтики, Римского клуба, почетным доктором ряда крупнейших университетов и иностранным членом академий наук и научно-технических обществ многих стран.

Б. Е. Патон – лауреат Ленинской и Государственной премий СССР, заслуженный деятель науки и техники УССР, заслуженный изобретатель СССР, дважды Герой Социалистического Труда, Герой Украины; среди его наград – ордена Ленина, Трудового Красного Знамени, Дружбы народов, «За заслуги перед Отечеством», орден Князя Ярослава Мудрого и другие отечественные и зарубежные ордена и медали.

Он удостоен многочисленных научных наград и дипломов, среди которых золотая медаль М. В. Ломоносова АН СССР, золотая медаль Л. Лозанна Ассоциации металлургов Италии, медаль акад. С. И. Вавилова АН СССР, золотая медаль им. В. Г. Шухова Союза инженеров и научно-технических обществ России, золотая медаль Всемирной организации интеллектуальной собственности, премия им. В. Вернадского Фонда интеллектуального сотрудничества «Украина – XXI век» и др.

От имени читателей и авторов поздравляем юбиляра с днем рождения. Желаем Человеку и Ученому и дальше поражать окружающих неукротимой жаждой познания, блестящей, без преувеличения, юношеской работоспособностью, неослабевающим интересом ко всему новому в науке, обществе и жизни. Многогранная личность Бориса Евгеньевича служит примером не просто поразительно активного образа жизни на протяжении десятилетий, но и неуклонного прогресса.

Будьте здоровы и счастливы, дорогой именинник!

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Редакция и редколлегия журнала
«Современная электрометаллургия»

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ



УДК 669.187.526.001.57

РАЗРАБОТКА ПРОГРЕССИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ПРОИЗВОДСТВА ТИТАНОВОЙ ПРОДУКЦИИ В ИЭС им. Е. О. ПАТОНА

Н. П. Тригуб, Г. В. Жук

Описаны основные этапы развития электронно-лучевой металлургии титана в ИЭС им. Е. О. Патона. Показаны достижения в процессе разработки новых технологий производства высококачественных слитков, создания отечественных сплавов на основе титана. Представлена структура производства титановых слитков и полуфабрикатов.

The main stages of development of electron beam metallurgy of titanium at the E. O. Paton Electric Welding Institute are described. Achievements in the process of development of new technologies of production of high-quality ingots, development of national alloys on titanium base are shown. Structure of production of titanium ingots and semi-products is presented.

Ключевые слова: титан; электронно-лучевая плавка; слиток; титановый сплав; переработка губчатого титана; недробленый блок; полый слиток; трубы титановые; промышленность Украины

Сплавы на основе титана благодаря высокой удельной прочности и другим уникальным свойствам нашли широкое применение в аэрокосмической технике, самолето- и судостроении, химическом машиностроении, энергетике и других областях промышленности.

В бывшем СССР Украина не имела мощностей по выплавке титановых слитков из губчатого титана, а была поставщиком сырья (титановая губка) на Верхне-Салдинский металлургический комбинат (Россия). С развалом СССР Украина осталась без полуфабрикатов из титана и его сплавов для нужд отечественного машиностроения. Возник вопрос о создании собственного металлургического производства слитков из титана и сплавов на его основе.

Научный и практический подход Б. Е. Патона к решению реальных технических задач для нужд отечественной промышленности позволил в короткий срок разработать отечественные сплавы на основе титана, технологию их производства, изготовить оборудование и в 1996 г. создать Государственное предприятие «Научно-производственный центр «Титан» Института электросварки им. Е. О. Патона Национальной академии наук Украины» с мини-заводом производительностью 3000...5000 т титановых слитков в год в зависимости от их сортамента способом электронно-лучевой плавки (рис. 1).

Основным сырьем для изготовления слитков титановых сплавов является губчатый титан, производимый на Запорожском титано-магниевом комбинате. При этом впервые в мире для получения высоколегированных сплавов титана использован способ ЭЛП; создана и внедрена в производство технология выплавки слитков из недробленых блоков

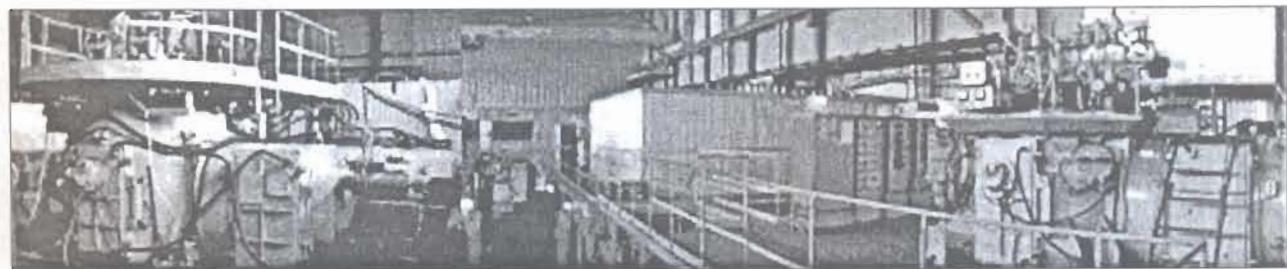


Рис. 1. Цех электронно-лучевой плавки титана



Рис. 2. Слитки ЭЛП диаметром 100...600 мм

губчатого титана; освоена выплавка полых слитков для производства крупногабаритных титановых труб; созданы оборудование и технология для оплавления боковой поверхности слитков, успешно применяемые вместо их механической обработки.

Проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона фундаментальные исследования процессов испарения компонентов сплавов из расплава в вакууме и кристаллизации слитка при электронно-лучевой плавке с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) позволяют прогнозировать химический состав и структуру выплавляемых слитков титановых сплавов и обеспечивают получение слитков с гарантированным химическим составом. Применение промежуточной емкости дает возможность избежать попадания в кристаллизатор включений высокой и низкой плотности.

Запущена в производство технология выплавки слитков из легированных титановых сплавов (ПТ-1М, ПТ-7М, ПТ3-В, ВТ6, ВТ3-1, ВТ-22, Grade 5, Grade 9, Grade 12, и др.). Ультразвуковой контроль слитков и исследования темплетов показали, что структура металла плотная, однородная, дефекты отсутствуют. Полученные слитки (рис. 2) полностью отвечают требованиям международных стандартов как по содержанию легирующих элементов и примесей, так и по их распределению в сечении слитка.

Разработанная технология может применяться для получения высококачественных слитков титановых сплавов, гарантированно не содержащих включений низкой и высокой плотности.

Для дальнейшего снижения себестоимости и трудоемкости изготовления слитков титана из первичного сырья в ИЭС им. Е. О. Патона впервые в мире разработана технология ЭЛПЕ недробленых блоков губчатого титана массой 0,7...3,8 т, что позволяет исключить из технологического цикла производства слитков не только этап прессования расходуемого электрода для последующего переплава, но и операцию дробления блоков губчатого титана на куски размерами до 70 мм.

Предложенная технология ЭЛПЕ блоков губчатого титана обеспечивает повышение на 20 % технико-экономических показателей, в сравнении с ЭЛПЕ губчатого титана фракции 12...70 мм.

Для реализации разработанной технологии электронно-лучевой плавки недробленого блока губчатого титана в ИЭС им. Е. О. Патона в 2004 г. создана электронно-лучевая установка УЭ5810, не имеющая аналогов в мире. Она позволяет совместить процессы оплавления боковой поверхности блока на этапе предварительного подогрева и плавки в одной вакуумной камере (рис. 3).

Реализация указанной технологии в условиях промышленных предприятий позволила организовать в Украине конкурентоспособное на мировых рынках производство высококачественных слитков и слитков-слябов титана.

Традиционно для слитков на различных стадиях передела металла производят механическую обработку. Количество отходов, как правило, составляет 5...15 % массы защищаемого слитка.

Впервые в мире для сокращения потерь металла вместо механической обработки в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины предложена и разработана технология оплавления боковой поверхности слитков как круглого, так и квадратного сечений, а также слитков-слябов электронными лучами и создано соответствующее оборудование для ее реализации (рис. 4).

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

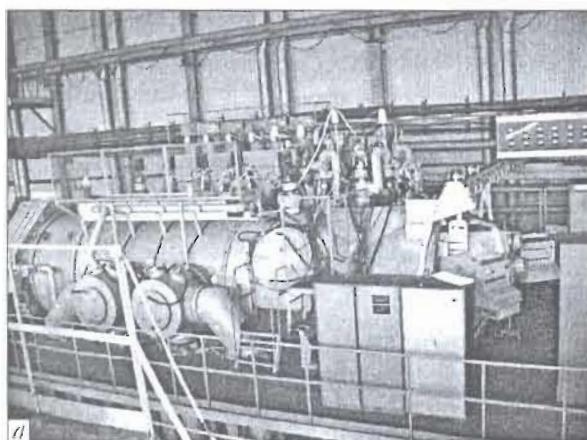
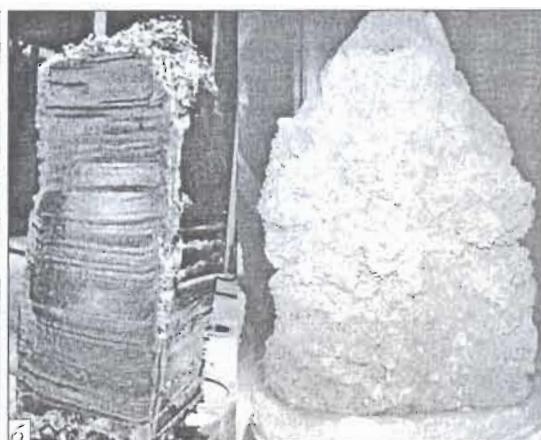


Рис. 3. Электронно-лучевая установка УЭ5810 (а) и недробленные блоки губчатого титана (б)



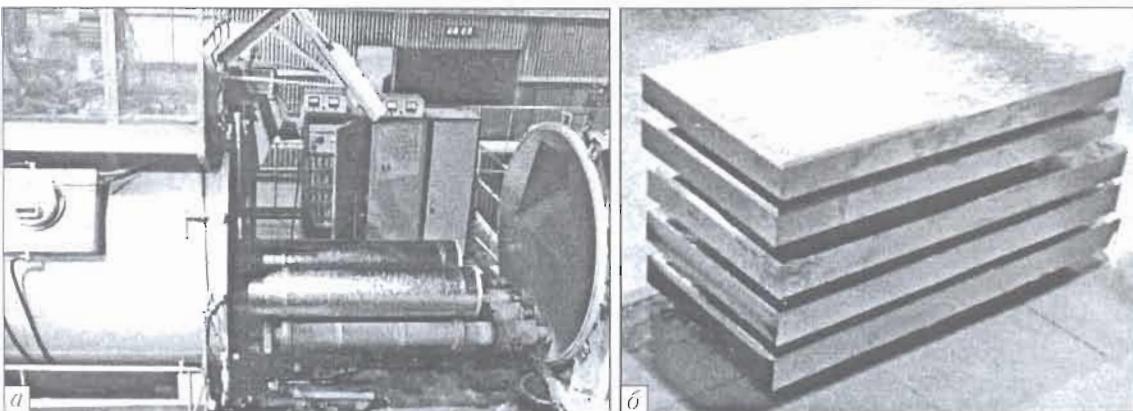


Рис. 4. Установка для оплавления титановых слитков (а) и оплавленные плоские слитки (б)

Впервые в мировой практике предложена технология получения горячекатанных труб непосредственно из литой трубной заготовки, успешно реализованная на Никопольском Южно-трубном заводе в 1998–2000 гг., а также технология производства полых слитков (рис. 5) для изготовления крупногабаритных титановых труб и колец из отечественных титановых сплавов.

Разработано и освоено производство отечественных сплавов из титана с более высокими механическими и эксплуатационными свойствами, чем существующие в мировой практике для использования их в медицине, химическом машиностроении, автомобилестроении, в авиационной и военной технике: сплавы Т80 ($Ti-2Al-1,2Fe-1,2Nb-0,6Zr$) и Т90 ($Ti-4Al-1,2Fe-1,2Nb-0,6Zr$), заменяющие соответственно сплавы ОТ4-1 и ОТ4 (ГОСТ 19807–91) (Россия) и превосходящие их по уровню свойств и свариваемости, а также сплав Т100 ($Ti-5Al-2,5Fe-3,5Nb-0,6Zr$), по механическим свойствам превосходящий широко известный сплав титана ВТ6/Grade5 ($Ti-6Al-4V$) (ASTM B 348-00, ASTM B 2658-00, ГОСТ 19807–91) и Т-110 ($Ti-5Al-1Mo-1V-5Nb-1Fe-0,3Zr$), по уровню технологичности, свариваемости и работоспособности в условиях циклических нагрузок превышающий широко используемый в авиации сплав ВТ22 (ГОСТ 19807–91, Россия). Первый отечественный высокопрочный сплав Т-110 предназначен для использования в самолетостроении (АН70 и АН148).

В ИЭС им. Е. О. Патона достигнуты значительные успехи в развитии титановой промышленности Украины и имеются большие перспективы для дальнейшего ее развития [1–5]. Основой для этого является наличие мощностей в Государственном предприятии «Научно-производственный центр «Титан» Института электросварки им. Е. О. Патона Национальной академии наук Украины», что позволяет выплавлять слитки из титановых сплавов различных химического состава и сортаментов от 50 до 20000 кг как отечественной разработки, так и зарубежной; наличие квалифицированных специалистов, способных создавать отечественные сплавы и оборудование нового поколения для их производства.

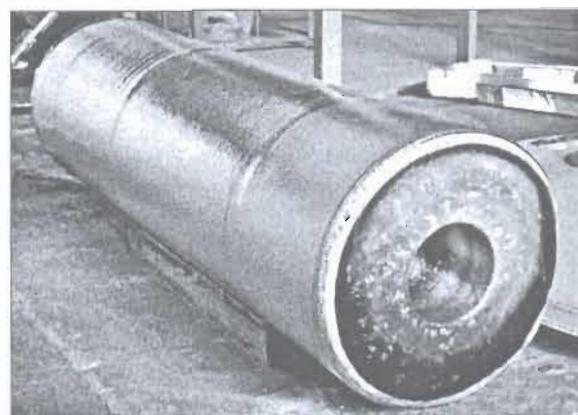


Рис. 5. Полый слиток титана диаметром 600 и 200, длиной 2000 мм

В настоящее время Государственным предприятием «Научно-производственный центр «Титан» Института электросварки им. Е. О. Патона Национальной академии наук Украины» установлены кооперационные связи со специализированными предприятиями Украины, что позволяет производить различный сортамент полуфабрикатов из титана (поковки, прутки, трубы) как для нужд Украины, так и на экспорт.

- Пат. 205914 Україна, МПК В 22 Д 23/00. Спосіб одержання біметалу в електроно-променевих установках / Б. Є. Патон, М. П. Тригуб, Г. В. Жук та ін. – Опубл. 27.02.98, Бюл. № 1.
- Пат. 78393 Україна, МПК С 22 В 9/22, С 22 В 4/00, С 22 С 1/02, С 22 С 14/00. Спосіб одержання зливків сплавів на основі титану / М. П. Тригуб, Г. В. Жук, В. В. Телін, С. І. Давидов, А. Ю. Северін. – Опубл. 27.08.07, Бюл. № 13.
- Пат. 56194 Україна, МПК С 22 В 9/22, В 22 Д 11/045, 11/06, 11/12, С 21 С 5/56. Спосіб одержання тощотинця листа в установках електроно-променевого плавлення / Б. Є. Патон, М. П. Тригуб, Г. В. Жук та ін. – Опубл. 15.05.03, Бюл. № 6.
- Пат. 79021 Україна, МПК С 22 В 9/22, В 22 В 9/00. Установка для одержання труб зі сплавів на основі титану / Б. Є. Патон, М. П. Тригуб, Г. В. Жук, В. Д. Коришнук. – Опубл. 10.05.07, Бюл. № 5.
- Пат. 78393 Україна, МПК С 22 В 9/22, В 22 Д 11/045. Спосіб одержання порожнинних зливків в установках електроно-променевого плавлення / М. П. Тригуб, Г. В. Жук, С. В. Ахонин, В. О. Березов. – Опубл. 15.03.07, Бюл. № 3.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 26.09.2008



ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА ТИТАНОВЫХ ТРУБ ДЛЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СПОСОБОМ ЭЛПЕ

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

Показана перспектива развития производства титановых труб для нефтегазодобывающей промышленности в прибрежных шельфах Мирового океана. Предложен способ получения титановых труб большого диаметра, сочетающий выплавку трубной заготовки и последующую полунепрерывную раскатку в установках электронно-лучевого переплава. Такой способ позволяет существенно сократить расходы по переработке, повысить выход годного металла за счет уменьшения количества технологических операций при производстве труб.

Prospects in the progress of production of titanium pipes for oil and gas industry in the coastal shelf of the World ocean are shown. Method of manufacture of large-diameter titanium pipes is offered, combining the melting of tubular billets and subsequent semi-continuous rolling by expanding in the installations of electron beam remelting. This method allows great reduction in expenses for processing, increasing in efficient metal output by reduction in the amount of technological operations in manufacture of pipes.

Ключевые слова: титановая труба; электронно-лучевая плавка с промежуточной емкостью; электронно-лучевая установка; прокатка труб

Природные ресурсы, в первую очередь минерально-сырьевые, составляют основу существования человечества и определяют будущее мировой цивилизации. К настоящему времени в мире известно около 1000 морских месторождений нефти и газа. По оценкам ученых, разведанные в пределах континентальной суши мировые запасы минерального сырья ненадолго обеспечат растущие потребности человечества: нефти хватит на 40 лет, природного газа — на 65 [1].

Согласно результатам ряда исследований, общие потенциальные ресурсы нефти и газа дна Мирового океана оцениваются в 1,8...2,1 трлн т условного топлива, что намного превышает разведанные запасы углеводородного сырья на суше. При этом наиболее перспективной является мелководная часть акваторий Мирового океана — континентальный шельф, наиболее доступный для освоения углеводородных ресурсов. Нефтяные компании всего мира, озабоченные истощением разрабатываемых ими месторождений на суше, активизируют свою деятельность на морских шельфах и примыкающим к ним участках континентального склона и его подножия. И если раньше перспективы нефтегазоносности континентального шельфа рассматривались на глубинах до 200 м, то в настоящее время нефть добывают уже на глубине моря свыше 1000 м. При-

чем исследования и инженерные работы интенсивно ведутся в разных странах на глубинах более 2000 м. В мире на шельфе и прибрежных акваториях сегодня добывают 35 % нефти и около 32 % газа.

Несмотря на истощение сухопутных месторождений и существенный рост мировых цен на нефть, морское бурение по объемам работ в последние годы существенно уступает сухопутному, что объясняется ростом себестоимости нефтедобычи при переходе к освоению глубоководных, менее богатых, месторождений.

Постепенное смещение фронтов работ в тяжелые географические условия (бурение в условиях вечной мерзлоты или на шельфе), высокая степень минерализации пластовой воды; повышение агрессивности добываемых углеводородов (значительное содержание H_2S и CO_2); наличие аэробных и анаэробных (особенно сульфидообразующих) составляющих в продуктах добычи и окружающей среде; повышенные температуры рабочих сред; пониженные температуры атмосферы до минус 40...50 °C; возможность солевых и парафинообразных отложений на поверхностях; высокое давление рабочих сред; наличие абразивных компонентов в транспортируемых продуктах, а также увеличение глубины скважин повышают требования к качеству труб, механической прочности и коррозионной стойкости металла, использующегося для их изготовления.



В условиях морской волны, достигающей 12 м и более, самым уязвимым местом буровых платформ являются опорные колонны, которые в процессе эксплуатации испытывают огромные механические нагрузки и особенно подвергаются коррозионному воздействию воды и воздуха (рис. 1).

В настоящее время эксплуатируется огромное количество труб, фактический срок службы которых в 2–3 и более раз меньше нормативного. Выход из строя труб влечет за собой большие материальные затраты, связанные в первую очередь с ремонтом и установкой новых труб. Что касается труб нефтяного сортамента, то необходимо отметить, что проблема увеличения долговечности и надежности является особенно острой. Это прежде всего относится к насосно-компрессорным и нефтегазопроводным трубам, интенсивно подвергающимся коррозионно-эрзационному воздействию агрессивных сред и различных механических нагрузок.

Многолетний опыт использования насосно-компрессорных труб из черных металлов показал, что средний срок их службы составляет 3 года. Согласно данным промышленной статистики, в настоящее время количество аварий с насосно-компрессорными трубами по некоторым месторождениям СНГ достигает 80 % общего количества аварий скважинного оборудования. При этом затраты на ликвидацию неблагоприятных последствий коррозионных разрушений составляют до 30 % затрат на добычу нефти и газа [1].

Процесс освоения нефтяниками нефтедобычи на морских шельфах стал закономерным фактом. В связи с этим разработка основных принципов проектирования и строительства морских установок и выбора материалов является сегодня основополагающим фактором, а увеличение срока службы труб нефтяного сортамента — первоочередной задачей предприятий трубной промышленности. Трубы нового поколения напрямую призваны снизить себестоимость добычи нефти.

До 15 % железа ежегодно уничтожается из-за коррозионного воздействия. Скорость коррозии труб из нержавеющих сталей составляет примерно 0,20...0,25 мм/год, а срок службы установки не превышает 6...8 лет при проведении профилактического ремонта 1 раз в 3...6 месяцев. В агрессивных средах этот процесс ускоряется. Затраты, связанные с защитой металла, непомерно велики. Это и дополнительные покрытия, и утолщение стенок аппаратуры, что способствует удорожанию процессов и оборудования.

Использование традиционных металлов порождает постоянные проблемы: убытки от коррозии, простой оборудования в связи с ремонтом, снижение производительности в результате засорения аппаратуры.

Титан в различных отраслях применения продемонстрировал уникальное сопротивление почти всем видам коррозии, с которыми приходилось сталкиваться при разработке морских нефтяных месторождений [2]. Отличием титановых сплавов

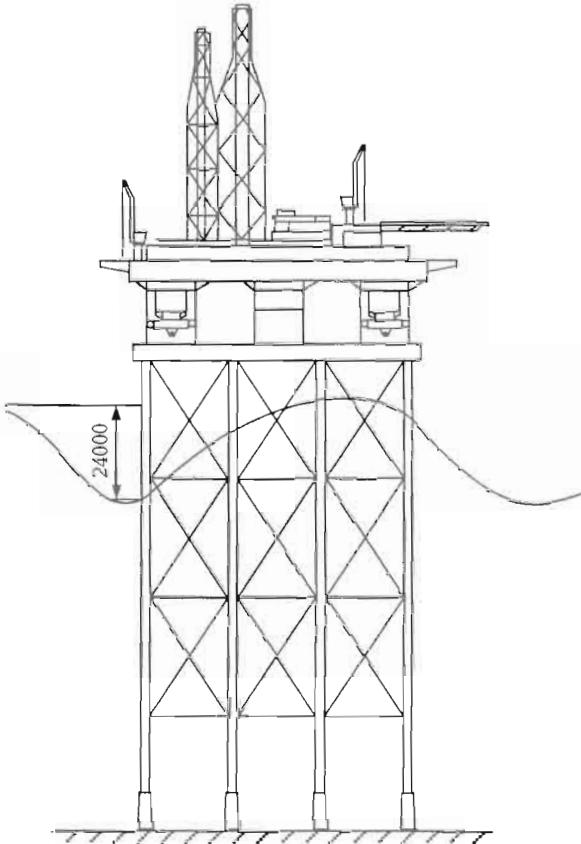


Рис. 1. Опорные колонны буровой платформы

от традиционно применяемых конструкционных является высокая коррозионная стойкость против микробиологической коррозии, т. е. против сульфидных бактерий, особенно активных в нефтепродуктах с высоким содержанием серы. При наличии в рабочей среде раствора соляной кислоты, насыщенной сероводородом, титан стоек как против общей и питтинговой коррозии, так и коррозионного растрескивания, а скорость коррозии титановых труб составляет менее 0,0005 мм/год. Скорость коррозии сплава титана ВТ1-0 после различных видов переплава приведена в таблице.

По мере создания все более глубоководных систем морской нефтедобычи резко возросла необходимость применения титановых сплавов с целью экономии массы оборудования на платформе. По

Скорость коррозии ВТ1-0 после ВДП* и ЭЛПЕ**, мм/год		
Условия коррозионных испытаний	ВДП	ЭЛПЕ
10 % H ₂ SO ₄ , 25 °C, 336 ч	0,3591 0,4101	0,2814 0,2993
10 % HCl, 25 °C, 336 ч	0,2844 0,3202	0,1800 0,1813
0,9 % H ₂ SO ₄ , 50 °C, 100 ч	0,0036	0,0013
Морская вода без нагрузки, 40 °C, 1000 ч, σ = 0,90 σ _r	0,0005 0,0006	0,0001 0,0003

* Вакуумно-дуговой переплав.
** Электронно-лучевая пламка с промежуточной ёмкостью.

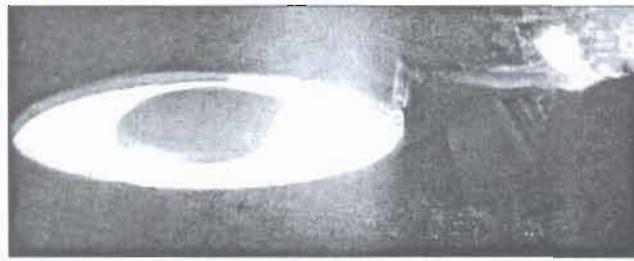


Рис. 2. Процесс получения титановой трубной заготовки способом ЭЛПЕ

данным компании «Shell Oil», снижение массы подводного оборудования на 1 т позволяет уменьшить массу опорного оборудования на 3 т, что равнозначно экономии около 150 тыс. дол. Для элементов подводного оборудования требуется использование сплавов с высокой удельной прочностью и малым модулем упругости. Согласно мнению ведущих фирм, в глубоководной нефтедобыче титан и его сплавы должны стать одним из основных конструкционных материалов.

Таким образом, перспективы применения титана для изготовления оборудования объектов нефтедобывающей промышленности достаточно широки. Титановые сплавы характеризуются необходимым комплексом свойств, позволяющих использовать их в качестве материалов для изготовления труб нефтяного сортамента, в первую очередь для бурильных труб. Применение титановых сплавов в освоении нефтегазовых месторождений на шельфе перспективно для таких систем и оборудования, как глубоководные бурильные райзеры; обсадные трубы; добывающие райзеры; насосы и системы забортной, питьевой, буровой и попутной воды; трубопроводы циркуляционной системы технологических растворов; сепараторы жидкостные, теплообменное оборудование различного назначения; сосуды высокого давления; высокопрочные гибкие растяжки для фиксации платформы.

Применение титановых труб, отличающихся повышенными коррозионной стойкостью и надежностью, для комплектации эксплуатационных колонн, внутрипромыслового и магистрального транспорта нефти и газа позволяет значительно снизить технологическую аварийность и сократить затраты,

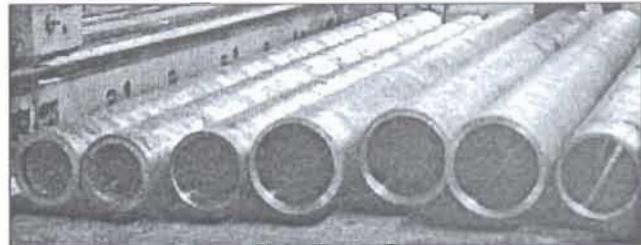


Рис. 4. Бесшовные титановые трубы большого диаметра

связанные с ликвидацией аварий и утечек транспортируемых продуктов и восстановлением окружающей среды, что, в конечном итоге, положительно отражается на себестоимости добычи и транспортирования нефти и газа.

Основным препятствием к применению титановых сплавов для бурильных труб является их высокая стоимость. Однако технология производства и обработки титановых сплавов совершенствуется и, соответственно, снижается их стоимость.

До настоящего времени проводили успешные эксперименты по применению для производства титановых труб слитков электронно-лучевой плавки (ЭЛП) [3–5]. Новым подходом в производстве труб с точки зрения экономии материала и сокращения технологических операций является выплавка титановых труб способом ЭЛПЕ.

С целью проверки возможности получения титановых трубных заготовок способом ЭЛПЕ выполнены экспериментальные плавки на электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью УЭ-182М. В качестве формирующего устройства использовали проходной кристаллизатор с центральным дном (рис. 2).

Освоена технология производства трубных заготовок из титана и его сплавов (рис. 3), позволяющая исключить операцию прошивки и, соответственно, снизить потери металла и затраты на производство бесшовных труб (рис. 4).

Из полых трубных заготовок на Криворожском турбинном заводе ОАО «КОНСТАР» изготовлены раскатные кольца диаметрами 1850 и 1415 мм с толщиной стенки 50 мм, высотой 350 мм (рис. 5), что подтвердило возможность изготовления труб боль-

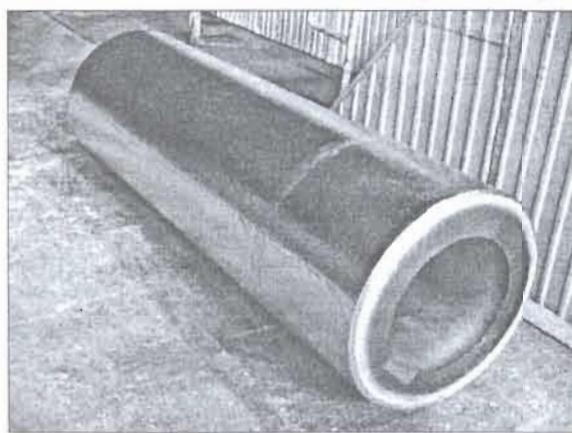


Рис. 3. Трубная заготовка диаметром 600, высотой 400 и длиной 2000 мм



Рис. 5. Раскатные кольца диаметрами 1850 и 1415 мм

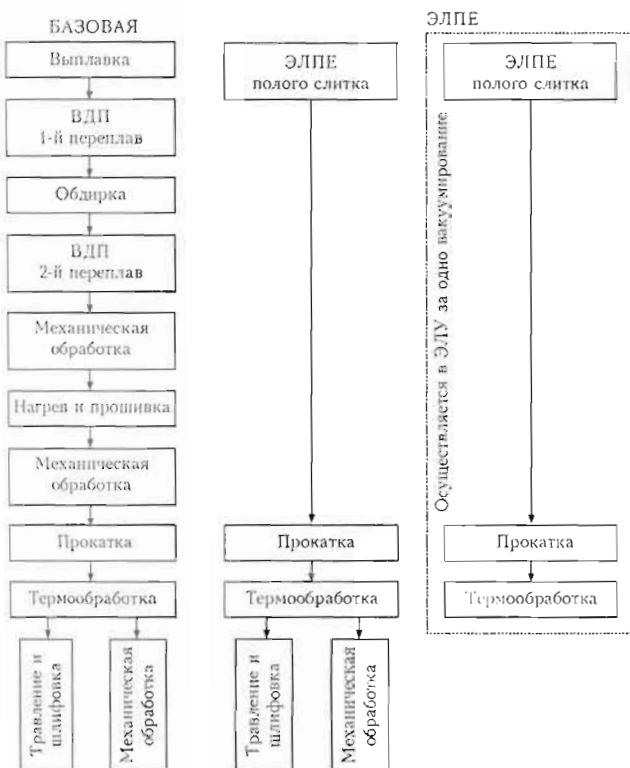


Рис. 6. Схема технологической последовательности производства труб

шего диаметра. Качество полученных колец отвечает требованиям ОСТ 1.90084-80.

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработан способ проведения процесса получения труб, сочетающий выплавку трубной заготовки и последующую полунепрерывную раскатку в установках электронно-лучевого переплава.

В новом способе процесс получения труб заключается в следующем. Плавится заготовка, наводится ванна жидкого металла в горизонтально расположенному кристаллизаторе, затвердевает металл в виде полого цилиндра, жидкий металл подают в кристаллизатор из промежуточной емкости и обогревают его электронными лучами, а полый цилиндр по мере затвердевания удаляют из кристаллизатора и подвергают прокатке с заданной степенью деформации. При этом необходимый режим деформации поддер-

живают электронным нагревом. Размеры получаемых труб следующие: диаметр до 2000 мм, длина до 24000 мм.

Процесс предназначен в первую очередь для изготовления труб большого диаметра из активных металлов и сплавов в плавильных вакуумных установках с независимыми источниками нагрева. Он позволяет существенно сократить расходы по переплавке, повысить выход годного металла за счет уменьшения количества технологических операций (рис. 6) — качественный металл получают за один переплав, исключаются различные виды промежуточных механических обработок, а также такая трудоемкая операция, как прошивка слитков.

Указанный способ проведения процесса получения труб, сочетающий выплавку трубной заготовки и последующую полунепрерывную раскатку в установках электронно-лучевого переплава, защищен патентами Украины [6-8].

- Шевченко А. А., Стрижак В. И. Производство труб для нефтяной промышленности. — М.: Металлургия, 1965. — 144 с.
- Полуфабрикаты из титановых сплавов / Н. Ф. Аношкин, М. З. Ермаков, Г. Д. Агарков и др. — М.: Металлургия, 1979. — 512 с.
- Получение титановых труб из заготовок электронно-лучевой плавки с использованием отходов / Т. Н. Буряк, В. С. Вахрушева, С. В. Ладохин и др. // Пробл. сиц. электрометаллургии. — 2001. — №3. — С. 24-29.
- Получение полых титановых слитков методом ЭЛПЕ / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Г. В. Жук и др. // Современ. электрометаллургия. — 2004. — №3. — С. 18-21.
- Жук Г. В., Березос В. А., Северин А. Ю. Математическое моделирование тепловых процессов при ЭЛПЕ полых слитков // Там же. — 2005. — №4. — С. 20-22.
- Пат. 78393 Украина, МПК С 22 В 9/22. Способ одержания порожистых зливків в установках електроно-променевого переплавлення / М. І. Тригуб, Г. В. Жук, С. В. Ахонін, В. О. Березос. — Опубл. 15.03.2007, Бюл. №3.
- Пат.79021 Україна, С 22 В 9/22. Установка для одержання труб з сплавів на основі титану / Б. Є. Патон, М. П. Тригуб, Г. В. Жук, В. Д. Корпійчук. — Опубл. 10.05.2007, Бюл. №6.
- Пат. 80570 Україна, МПК С 22 В 9/22. Способ одержання труб з сплавів на основі титану / М. І. Тригуб, Г. В. Жук, С. В. Ахонін, А. Ю. Северин. — Опубл. 10.10.2007, Бюл. №16.

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

Поступила 17.09.2008



УДК 669.187.526.001.57

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СЛИТКОВ ЭЛПЕ

Г. В. Жук

Описаны основные этапы моделирования теплофизических процессов формирования слитков ЭЛПЕ. Определены перспективные направления совершенствования моделей. Исследован процесс охлаждения крупногабаритных титановых слитков в условиях вакуума. Установлена зависимость времени охлаждения от размера слитков.

The main stages of modeling the thermo-physical processes of formation of EBCH ingots are described. Challenging trends in updating the models are defined. The process of cooling large-sized titanium ingots under vacuum conditions was investigated. The dependence of time of cooling on size of ingots has been established.

Ключевые слова: математическое моделирование; электронно-лучевая плавка; слиток; титановый сплав; кристаллизация; охлаждение

Метод математического моделирования уже давно и прочно занял свое место в исследовании процессов, происходящих при получении слитков способами специальной электрометаллургии. Он позволяет изучить такие аспекты переплава, как плавка исходной шихты, перемешивание и рафинирование компонентов сплава, формирование слитка в кристаллизаторе. При этом численно решаются задачи теплофизики, кинетики, гидродинамики и пр. Преимущество численных методов состоит в том, что они позволяют учитывать не только средние показатели физических величин, но и задавать их распределение в пространстве и времени, максимально приближенное к реальным процессам. Целью моделирования является отказ от дорогостоящего натурного эксперимента и вычисление распределения требуемого параметра в любой момент времени с заданной точностью. На практике, как правило, добиваются сокращения количества экспериментов за счет вычисления характера распределения и тенденции изменения требуемого параметра.

В полной мере оправдывает себя применение метода численного моделирования для электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ). Во-первых, способ ЭЛПЕ в последнее время нашел широкое применение в промышленности, он интенсивно развивается, совершенствуются технологии. Во-вторых, процесс достаточно дорогостоящий с точки зрения расхода электроэнергии (создание вакуума, перегрев поверхностного слоя металла) и стоимости переплавляемых материалов (высокореакционные титан, цирконий и тугоплавкие ниобий, tantal, молибден, металлы и сплавы на их основе).

Поэтому сокращение количества экспериментальных плавок экономически целесообразно.

В последние 10–15 лет созданы несколько математических моделей, описывающих различные стадии ЭЛПЕ: плавление исходной шихты, перемешивание и испарение металла и примесей в промежуточной емкости, формирование слитка в кристаллизаторе (в т.ч. выведение усадочной раковины), охлаждение слитка.

Плавление шихты с последующей обработкой расплава в промежуточной емкости наиболее полно представлено в моделях, описывающих перенос массы с учетом гидродинамических, физико-химических и кинетических факторов [1, 2]. С учетом испарения легирующих элементов и рафинирования металла от примесей модели позволяют с достаточной точностью прогнозировать химический состав металла, попадающего в кристаллизатор, в зависимости от состава шихтовой заготовки. Модель, описанная в работе [3], дает распределение элементов в слитке в зависимости от состава, поступающего из промежуточной емкости. К недостаткам моделей можно отнести оперирование с усредненными величинами без учета их пространственного распределения, например химических элементов в сечении шихтовой заготовки.

Поскольку изменение химического состава исходного металла происходит в основном в промежуточной емкости, наибольший интерес представляют процессы затвердевания слитка в кристаллизаторе, в первую очередь решение задачи переноса тепла с последующим вычислением параметров кристаллизации. Задачей настоящей статьи является анализ состояния моделирования теплофизических процессов в кристаллизаторе.

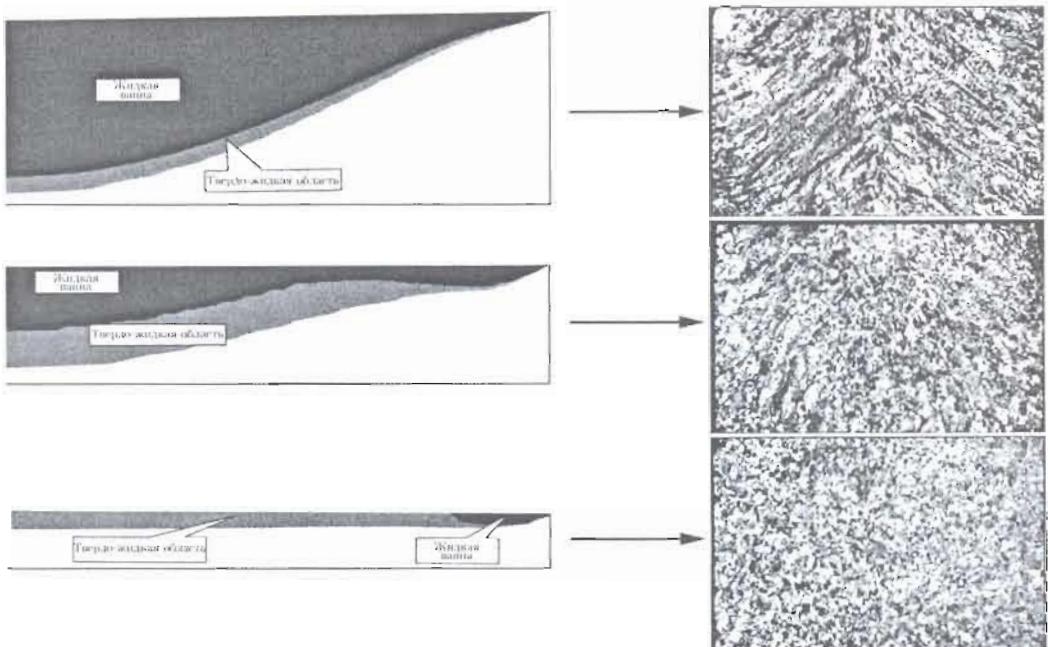


Рис. 1. Зависимость структуры слитка Ti-6Al-4V диаметром 200 мм от глубины жидкой ванны при плавке

Общие принципы математических моделей. Основные принципы моделирования теплофизических процессов в слитках, получаемых способами специальной электрометаллургии, сформулированы в работах [4, 5] для электрошлакового (ЭШП) и электронно-лучевого переплава (ЭЛП). Уравнение энергии с учетом зависимости теплофизических свойств от температуры и выделения скрытого тепла кристаллизации в интервале температур описывается уравнением теплопроводности Фурье.

В случае ЭЛП энергия в кристаллизатор поступает в виде распределенного источника нагрева на формируемой поверхности слитка и перегретого жидкого металла (верхний торец слитка), расходуется на нагрев водоохлаждаемых частей кристаллизатора, находящихся в плотном контакте со слитком (в головной части боковой поверхности и донной части слитка), и водоохлаждаемых стенок камеры за счет излучения (с остальной части боковой поверхности слитка). Граница между частями боковой поверхности слитка, обменивающимися с внешними холодильниками по законам кондуктивного теплообмена Ньютона-Рихмана и лучистого теплообмена Стефана-Больцмана, зависит от некоторой поверхностной температуры контакта, определяемой эмпирически.

Формирование слитка ЭЛПЕ. Созданы математические модели, позволяющие с достаточной точностью рассчитать температурные поля в формируемом слитке в заданный момент времени. Разработана модель, позволяющая вычислить распределение температур в цилиндрическом слитке в любой момент, а следовательно, форму и глубину металлической ванны [6]. Установлено, что глубина и объем ванны увеличиваются в начале плавления до достижения постоянного уровня, свидетельству-

ющего об установлении квазистационарного режима в верхней части слитка, на который больше не влияет изменение термического режима. В работе [7] довольно успешно совмещена теплофизическая задача с гидродинамической, что позволило значительно повысить точность расчетов. Вместе с тем, сделаны весьма грубые допущения об осесимметричности задачи, несмотря на то, что металл в кристаллизатор заливают на периферии несимметрично.

В работе [8] поставлена задача определения качественных закономерностей в процессах затвердевания слитков ЭЛПЕ. Для упрощения расчетов использованы допущения об описании теплоемкости

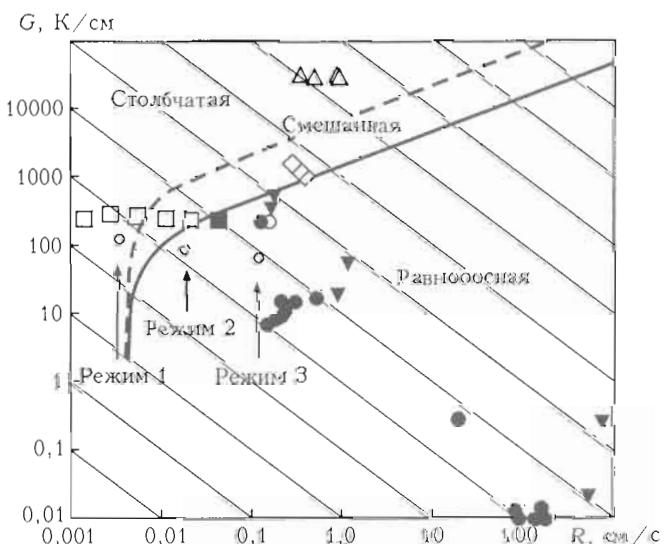


Рис. 2. Карта кристаллизации (скорость кристаллизации R , температурный градиент G) для слитков титанового сплава Ti-6Al-4V (стрелками отмечены данные работы [9] по слиткам ЭЛПЕ): ■ — зонная плавка; ● — литье в цилиндрический кристаллизатор; ▼ — зонная плавка; ♦ — оплавление CO₂-лазером; ▲ — отливка твердотельным лазером; ■ — равноосная; □ — смешанная; □ — столбчатая

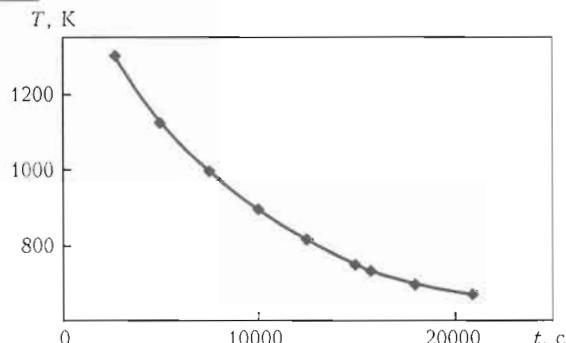


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры T на поверхности слитка от времени остывания t

металла в жидкой фазе путем умножения известной теплоемкости в твердой фазе на некоторый эмпирический коэффициент, тем самым исключив из описания поведения жидкой фазы гидродинамические аспекты. При этом удалось смоделировать режимы плавки, при которых достигаются различные состояния головной части формируемого слитка (с глубокой ванной, с мелкой ванной и без ванны жидкого металла) подтвержденные экспериментально (рис. 1).

Важным шагом вперед стало моделирование основных теплофизических параметров кристаллизации слитка: скоростей охлаждения и кристаллизации расплава, градиента температур в слитке [9]. Справедливость расчетов подтвердило совпадение теплофизических характеристик описанных выше режимов с экспериментальными данными многочисленных экспериментов других исследователей [10] (рис. 2).

Выявление усадочного (теплового) центра. Причиной возникновения усадочной раковины в кристаллизующемся слитке является наличие на заключительной стадии процесса выплавки слитка развитой ванны жидкого металла. Избежать возникновения указанных дефектов в головной части позволило создание на заключительном этапе плавки такого режима обогрева поверхности слитка в кристаллизаторе, при котором глубина ванны жидкого металла плавно уменьшалась до нулевого значения без образования твердой корки на торце слитка [11]. При этом тепловой центр перемещается из глубины на поверхность слитка, и замкнутых жидких полостей в головной части слитка не возникает. Были рекомендованы оптимальные технологические параметры вывода усадки.

Охлаждение слитка. Проблема моделирования охлаждения слитка ЭЛПЕ появилась после того, как в электронно-лучевых печах начали изготавливать цилиндрические слитки массой в несколько тонн. При этом вступил в силу масштабный фактор. Поскольку масса слитка пропорциональна третьей степени его радиуса, тогда как площадь поверхности — второй степени радиуса, т. е. с увеличением диаметра слитка время его остывания в условиях вакуума расчет при значительной массе может достигать больших значений, неприемлемых с точки зрения кон-

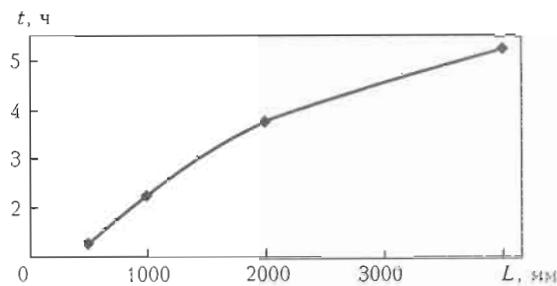


Рис. 4. Зависимость продолжительности остывания от длины L слитка

курентоспособности технологии. Технологически представляет интерес вычисление времени остывания слитка до значений температуры 400...450 °С (673...723 К), при которых, как показывает практика, окисление поверхности слитка минимально и не требует удаления поверхностного слоя.

Для расчета времени остывания слитка использовали математическую модель [12], усовершенствованную таким образом, что после выведения усадочной раковины электронно-лучевой нагрев слитка «выключали» и остывание происходило за счет излучения. Расчеты проводили для слитка титанового сплава Ti-6Al-4V диаметром 600 мм, при этом длину слитка варьировали от 0,5 до 4,0 м. Рассчитывали температурные поля слитка с интервалами в 1 с до достижения поверхностью слитка указанной критической температуры. Изменение во времени максимальной температуры поверхности этого слитка в процессе остывания представлено на рис. 3. Как видно из рисунка, с понижением температуры слитка отвод тепла за счет излучения становится менее эффективным, и температура слитка выравнивается по его объему.

На основании данных рассчитанных полей температур построена зависимость продолжительности остывания от длины слитка (рис. 4).

График зависимости представляет собой кривую с тенденцией к снижению роста, но уже на длине слитка 4 м время его остывания превышает 5 ч (время выплавки слитка при производительности 500 кг/ч составляет не более 12 ч).

Выводы

1. Показано, что математическое моделирование позволяет эффективно исследовать процессы получения слитков ЭЛПЕ (кристаллизация, выплавка, усадка, остывание).

2. Установлено, по мере увеличения массы выплавляемых слитков возрастает влияние на технологию ЭЛПЕ этапа остывания слитка.

3. Определено, что для слитков типовых слитков массой 5 т остывание в условиях вакуума составляет более 5 ч, что сравнимо с временем их выплавки.

1. Математическое моделирование процесса электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью и его применение для производства титана / Ж. И. Белою, Е. Флорго, Е. Эсс, Д. Аблазер // Шроц. спбц. инжинирингстадиургии. — 1996. — № 4. — С. 27-37.



2. Электронно-лучевая плавка титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. — Киев: Наук. думка, 2006. — 248 с.
3. Лесной А. Б., Демченко В. Ф., Жадкевич М. Л. Моделирование гидродинамики и теплообмена при кристаллизации слитков электронно-лучевого переплава // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2001. — №2. — С. 17–21.
4. Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве / Б. И. Медовар, В. Л. Шевцов, Г. С. Маринский и др. — Киев: Наук. думка, 1978. — 304 с.
5. Электронно-лучевая плавка крупных слитков сложнолегированных сплавов с мелкозернистой структурой / Д. А. Козлгин, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, А. Я. Деречка // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1994. — №3–4. — С. 42–47.
6. Термогидродинамическое состояние расплава при электронно-лучевом переплаве слитка титана / Ж.-П. Белло, А. Жарди, С. Аис, Д. Аблазер // Там же. — 1997. — №3. — С. 3–18.
7. Лесной А. Б., Демченко В. Ф. Моделирование гидродинамики и массообмена при электронно-лучевом переплаве титановых сплавов // Современ. электрометаллургия. — 2003. — №3. — С. 19–23.
8. Жук Г. В., Тригуб М. П., Калинок А. Н. Влияние скорости охлаждения на структуру цилиндрических слитков ЭЛПЕ титанового сплава Ti-6Al-4V // Процессы литья. — 2003. — №4. — С. 79–82.
9. Жук Г. В., Березос В. А., Тригуб Н. П. Прогнозирование структуры титановых слитков-слабов, получаемых способом ЭЛПЕ // Современ. электрометаллургия. — 2005. — №3. — С. 28–30.
10. Zhuk H. V., Kobryn P. A., Semiatin S. L. Influence of heating and solidification conditions on the structure and surface quality of electron beam melted Ti-6Al-4V Ingots // JMPT. — 2007. — №190. — Р. 387–392.
11. Калинок А. Н., Жук Г. В., Тригуб Н. П. Моделирование режимов вывода усадочной раковины в цилиндрических слитках ЭЛПЕ // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2002. — №1. — С. 23–25.
12. Жук Г. В., Ахонина Л. В., Тригуб Н. П. Математическое моделирование процессов кристаллизации титанового сплава Ti-6Al-4V при ЭЛПЕ // Там же. — 1998. — №2. — С. 21–25.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 17.09.2008

УДК 669.187.526:51.001.57

РАЗРАБОТКА И ПОЛУЧЕНИЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА С ПОВЫШЕННЫМИ ЖАРОПРОЧНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

**А. Ю. Северин, Г. В. Жук, Н. П. Тригуб,
В. Н. Замков, П. Ф. Топольский, И. К. Петриченко**

Разработан и получен сплав на основе титана с повышенными жаропрочными свойствами и ресурсом работы, по сравнению с существующими жаропрочными сплавами. Установлена возможность улучшения жаропрочных свойств сплавов титана, выбрана система легирования. Рассчитан состав шихты и создана технология электронно-лучевой плавки для данного сплава. Разработаны режимы его деформации и определены оптимальные режимы термической обработки. Исследована структура сплава после деформации и термической обработки.

Alloy on the titanium base with increased heat-resistant properties and service life, as compared with existing heat-resistant alloys, has been developed and produced. The feasibility was established for improving the heat-resistant properties of titanium alloys, system of alloying was selected. Charge composition was calculated and technology of electron beam melting for the given alloy was developed. Conditions of its deformation were developed and optimum conditions of thermal treatment were defined. Structure of alloy after deformation and heat treatment was investigated.

Ключевые слова: жаропрочные титановые сплавы; электронно-лучевая плавка; деформация; термическая обработка; механические свойства; микроструктура

Для создания авиационных двигателей нового поколения с рабочими температурами на первой ступени двигателя более 600 °C необходимо решить проблемы разработки титановых сплавов с повышенной жаропрочностью. Жаропрочные титановые сплавы, выпускаемые серийно, имеют требуемый ресурс при значениях температуры до 500...550 °C.

В последние годы в качестве перспективных жаропрочных материалов рассматриваются сплавы на основе алюминидов титана TiAl, Ti₃Al. Однако они имеют очень низкую пластичность при температуре 20 °C, что резко снижает их технологичность и не позволяет использовать в узлах и деталях двигателей. Существуют также сплавы системы Ti-Al-Si с содержанием кремния до 4...5 %, что существенно повышает жаропрочность и жаростойкость, но пластичность при комнатной температуре в литом состоянии остается весьма низкой, что также предопределяет их неудовлетворительную технологичность.



Таблица 1. Химический состав полученного слитка после электронно-лучевого переплава

Место отбора проб	Массовая доля элементов, %							
	Al	Mo	W	Nb	Zr	Si	O	N
Головная часть	7,34	2,95	2,72	3,01	2,43	0,65		
Средняя часть	7,40	2,92	2,70	3,16	2,31	0,66	0,12	0,015
Донная часть	7,15	3,00	2,71	3,12	2,20	0,57		

Вторым, не менее важным, направлением усовершенствования жаропрочных титановых сплавов является повышение ресурса их использования при температурах 500...600 °C. Однако ни один из известных в данное время отечественных и зарубежных жаропрочных титановых сплавов не позволяет обеспечивать долговременный ресурс их использования при данных температурах.

В настоящее время в отечественной промышленности в качестве жаропрочных титановых сплавов чаще всего применяют двухфазные сплавы BT3-1,

Таблица 2. Механические свойства полученного сплава после прокатки и термических обработок, а также свойства известных жаропрочных сплавов

№ п/п	Состояние испытуемых образцов	σ_{ut} , МПа	$\delta, \%$	$\psi, \%$	$KCU, Дж/см$
1	После прокатки	1250	9	25	22
2	Отжиг 950 °C – 2 ч, воздух + старение 570 °C – 4 ч, воздух	1440	4	12	16
3	Отжиг 850 °C – 2 ч, воздух + старение 650 °C – 2 ч, воздух	1190	7	15	20
BT18Y	Исходное	910	7	15	15
IMI 834	»»	1030	6	15	Нет данных

BT8, BT9, BT25, а также псевдо- α сплав BT18Y. Эти сплавы используются при температурах от 450 до 600 °C. За рубежом промышленное применение получили сплавы IMI 550, IMI 679, IMI 685, IMI 829, IMI 834 [1-5], используемые для работы при температурах до 600 °C.

До последнего времени основным критерием при разработке жаропрочных сплавов были значения кратковременной и долговременной прочности при определенной температуре. В работе [1] сформулирован целый комплекс требований к жаропрочным сплавам. Основные из них следующие:

высокая кратковременная и долговременная прочность во всем интервале рабочих температур. Минимальные требования — временное сопротивление при комнатной температуре составляет 1000 МПа, кратковременная и «сточасовая» прочность при 400 °C — 750 МПа;

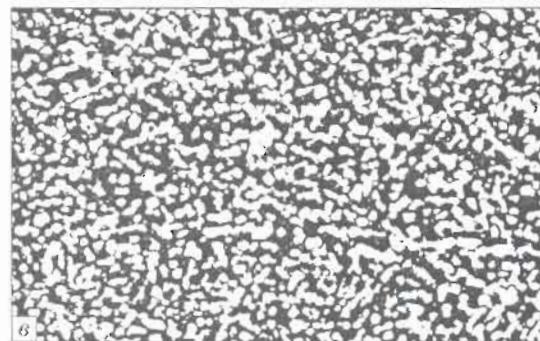
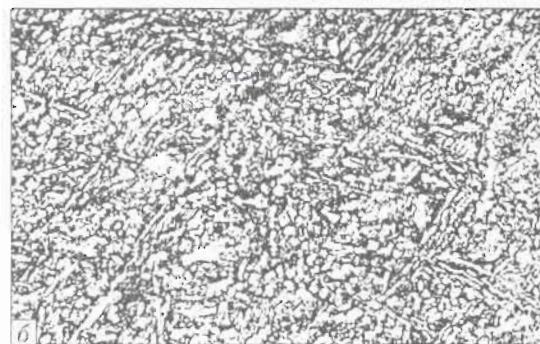
удовлетворительные пластические свойства при комнатной температуре (относительное удлинение более 5 %);

термическая стабильность: сплав должен сохранять свои пластические свойства после долговременного влияния высоких температур и напряжений. Минимальные требования — сплав не должен быть хрупким после 100 ч нагрева при любой температуре в пределах 20...500 °C;

высокое сопротивление усталости при комнатной и высоких температурах: предел выносливости при комнатной температуре должен составлять не менее 45 % временного сопротивления при комнатной температуре, а при 400 °C — не менее 50 % при соответствующей температуре;

высокое сопротивление ползучести. Минимальные требования — при температуре 400 °C и напряжении 500 МПа остаточная деформация за 100 ч не должна превышать 0,2 %.

Однако ни один из известных в настоящее время отечественных и зарубежных жаропрочных титановых сплавов не удовлетворяет комплексу перечисленных требований. Наиболее перспективными легирующими элементами при создании жаропроч-



Микроструктура ($\times 800$) исследуемого жаропрочного сплава:
а — после прокатки; б — после термической обработки (табл. 2, №3); в — после термической обработки (табл. 2, №2)



сплава
воздуха
KCU.
Дж/см²
22
16
20
15
Нет
данных
ВТ18У.
ах от 450
изменение
М1 685,
я работы
прием при
значения
ности при
формули-
прочным
временная
тератур.
противле-
000 МПа,
ость при
йства при
длнение
ен сохра-
долговре-
напряже-
е должен
ой тем-
и комнат-
жливости
авлять не
и комнат-
50 % при
минималь-
°С и на-
за 100 ч
щее время
их титано-
перечис-
зными ле-
каропроч-

ных, термически стабильных титановых сплавов являются алюминий, галлий (повышают температуру полиморфного превращения), цирконий и олово (почти не влияют на температуру фазового превращения), молибден, ванадий, ниобий, tantal (не имеют с титаном эвтектоидных точек), а также кремний (образует эвтектику, поэтому его содержание, как правило, не превышает 0,4%).

Для дальнейших исследований выбрали систему легирования Ti-7,5 Al-4,0 Nb-3,0 W-3,0 Mo-2 Zr-0,6 Si [6]. Экспериментальный слиток выплавляли способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ). В качестве исходной шихты использовали титановую губку марки ТГ-130 фракций 12...20 мм, чистые легирующие компоненты (алюминий, вольфрам, ниобий, цирконий и кремний). В процессе переплава использовали лабораторную электронно-лучевую печь УЭ-208. Выплавили экспериментальные слитки диаметром 75 мм и длиной 680 мм. От слитка отобрали пробы и образцы для проведения химического анализа, металлографических исследований и механических испытаний. Результаты химического анализа приведены в табл. 1.

Экспериментальный слиток показал равномерность распределения легирующих элементов и примесей по длине.

Для определения необходимого температурного режима горячей деформации установили температуру полиморфного превращения, составившую 1025 °C. Режим прокатки слитка следующий: нагрев до 1050 °C, выдержка 1 ч, прокатка за один нагрев от 70 до 32 мм. Затем провели повторный нагрев до температуры 960 °C, и слиток был докатан в этом же направлении до 11 мм.

После прокатки выполнили термическую обработку образцов исследуемого сплава. Механические свойства сплава после прокатки и термической обработки приведены в табл. 2.

Исследуемый жаропрочный титановый сплав имеет коэффициент стабилизации β -фазы $K_\beta = 0,49$. Его можно отнести к жаропрочным титановым двухфазным ($\alpha+\beta$)-сплавам мартенситного класса, способным упрочняться при термической обработке. Температура полиморфного превращения сплава составляет $T_{п.п.} = 1025$ °C.

Структуру исследуемого жаропрочного титанового сплава в деформированном состоянии изучали с помощью металлографического микроскопа

«Neophot». Следует отметить, что микроструктура сплава после прокатки достаточно равномерная и однородная, глобулярного типа (рисунок, а). Термическая обработка по следующему режиму: 850 °C – 2 ч, воздух +650 °C – 2 ч, воздух (табл. 2, №3) – способствует коагуляции структурных элементов (рисунок, б) и, как следствие, – незначительному снижению прочности и повышению ударной вязкости. Термическая обработка по режиму 950 °C – 2 ч, воздух +570 °C – 4 ч, воздух (табл. 2, №2) приводит к уменьшению доли первичной α -фазы в сплаве и ее коагуляции. Первичная α -фаза зафиксирована на фоне высокодисперсной ($\alpha+\beta$)-структуры, образующейся при распаде метастабильных фаз, фиксируемых на первой стадии термической обработки (рисунок, в). Такая термическая обработка сопровождается существенным повышением прочности и некоторым снижением пластичности.

Выводы

1. Установлена возможность улучшения жаропрочных свойств сплавов титана путем их легирования ниобием, вольфрамом и кремнием.
2. Выбрана система легирования исследуемого титанового жаропрочного сплава, разработаны состав шихты и технология электронно-лучевой плавки для данного сплава.
3. Разработаны режимы деформации полученного жаропрочного сплава и определены оптимальные режимы его термической обработки.

1. Соловина О. П., Глазунов С. Г. Жаропрочные титановые сплавы. – М.: Металлургия, 1976. – 447 с.
2. Металлография титановых сплавов // Е. А. Борисова, Б. А. Бочвар, М. Я. Брун и др. – М.: Металлургия, 1980. – 464 с.
3. Bania Paul J. Next generation titanium alloys for elevated temperature service // ISIJ Intern. – 1991. – 31, №8 – С. 840–847.
4. Meetham G. W. Aluminium and titanium alloys at high temperatures // Mater. and Des. – 1989. – 10, №1. – С. 15–22.
5. Blenkinsop P. A. High temperature titanium alloys // Des. Titanium: Pros. intern. conf. (Bristol, 7–8 July, 1986). – Bristol, 1986. – С. 191–197.
6. Исследование структуры и механических свойств сплава Ti-7,2 Al-2,9 Mo-2,7 W-3 Nb-2,3 Zr-0,4 Si / С. А. Фирстов, В. Н. Замков, Н. П. Бродниковский и др. // Современ. электрометаллургия. – 2006. – №2. – С. 33–38.

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

Поступила 17.09.2008



УДК 669.187.526.001.57

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ЭЛПЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Г. В. Жук, Н. П. Тригуб, А. А. Фесан

Исследованы энергетические характеристики процесса ЭЛПЕ титановых слитков (расход электроэнергии на 1 кг металла и длительность остывания слитка в условиях вакуума). Определена зависимость указанных показателей от диаметра слитка, в том числе для крупногабаритных слитков диаметром до 1100 мм.

Power characteristics of process of EBCH of titanium alloys were studied (consumption of electric power per kilogram of metal and duration of ingot cooling under vacuum conditions). Dependence of mentioned characteristics on ingot diameter, including that for large-sized ingots of up to 1100 mm diameter, was determined.

Ключевые слова: математическое моделирование; электронно-лучевая плавка; слиток; титановый сплав; кристаллизация; остывание

Электронно-лучевая плавка с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) становится все более эффективным процессом для производства слитков титановых

сплавов [1]. Она позволяет избегать попадания в слиток включений низкой и высокой плотности, эффективно влиять на процессы рафинирования и кристаллизации металла. Все это способствует повышению качества слитков, что дает возможность рекомендовать процесс ЭЛПЕ при производстве титановых изделий, применяемых в отраслях с повышенной ответственностью (авиации, атомной энергетике). ЭЛПЕ эффективна при изготовлении крупногабаритных слитков за счет перераспределения нагрева слитка в кристаллизаторе в сторону его периферии, что позволяет получить в слитке удовлетворительную с точки зрения его дальнейшей обработки структуру. Значительным прогрессом в области ЭЛПЕ в последнее время стало использование в качестве исходной шихты недробленых блоков губчатого титана [2], вследствие чего значительно сокращаются расходы на производство титана за счет исключения операций дробления и сортировки губки, значительного упрощения подготовки шихты к плавке, усреднения состава металла в процессе переплава.

Вместе с тем, при выплавке крупногабаритных слитков (диаметром около 1 м) возникают некоторые факторы, приводящие к удешевлению стоимости 1 кг слитка. Так, исследования авторов показали, что при увеличении диаметра цилиндрических слитков повышается как мощность электронно-лучевого нагрева при плавке (рис. 1, а), так и расход электроэнергии на 1 кг слитка (рис. 1, б).

Это происходит в результате увеличения площади зеркала жидкого металла в промежуточной емкости и кристаллизаторе, потеря энергии на излучение и испарение. Указанная зависимость справедлива только для низкого уровня производительности. Что касается высоких значений производитель-

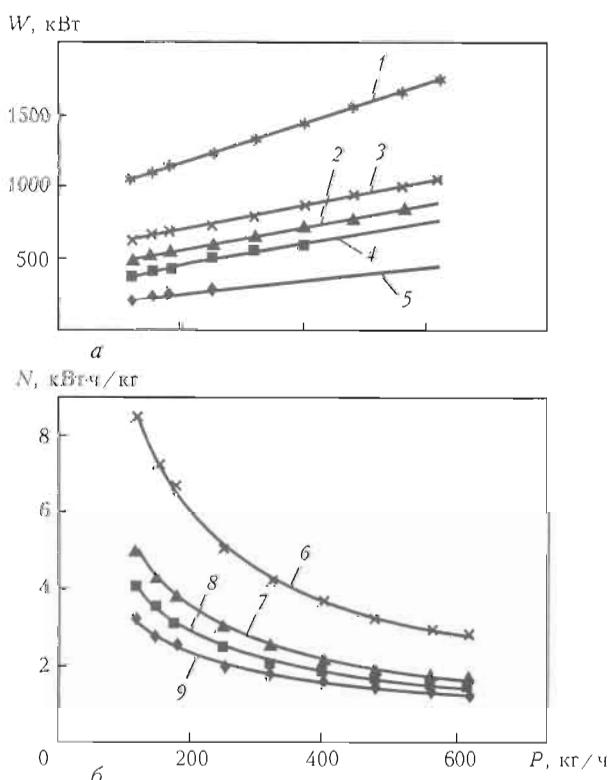


Рис. 1. Зависимость необходимой мощности W электронно-лучевого нагрева (а) и расхода электроэнергии N (б) от производительности плавки P для различных диаметров слитка, мм: 1 – 1100; 2 – 850; 3 – 630; 4 – 400; 5 – 300; 6 – 1100; 7 – 850; 8 – 630; 9 – 400

© Г. В. ЖУК, Н. П. ТРИГУБ, А. А. ФЕСАН, 2008

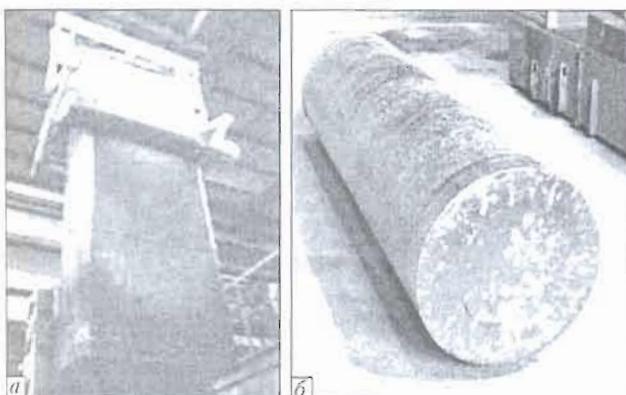


Рис. 2. Внешний вид слитка ЭЛПЕ после охлаждения: *a* — на воздухе [3]; *b* — в вакууме

ности для малых диаметров слитка, то они либо технически недостижимы, либо приведут к образованию недопустимой структуры производимых слитков. Если же исходить из технологически обоснованных значений производительности, то, например, расход электроэнергии на 1 кг металла для слитка диаметром 400 мм при производительности плавки 250 кг/ч больше, чем для слитка диаметром 850 мм при производительности плавки 620 кг/ч (рис. 1, *б*).

Важным с точки зрения протяженности во времени технологического процесса аспектом ЭЛПЕ является охлаждение слитка после окончания плавки. Для сокращения времени охлаждения общепринятыми мерами являются развакуумирование плавильной камеры и выемка слитка в условия атмосферы сразу после плавки. Здесь охлаждение слитка происходит значительно быстрее, но его поверхность при этом окисляется (рис. 2, *а*) [3, 4]. Охлаждение в условиях вакуума, хотя и способствует предотвращению окисления поверхности слитка (рис. 2, *б*), является достаточно длительным, особенно для массивных слитков. Если сам процесс выплавки довольно подробно изучен, то процесс охлаждения практически не исследован. Необходимы дополнительные исследования, в том числе и с применением методов математического моделирования, позволяющие оптимизировать соотношение времени выдержки слитка в вакуумной камере и степени окисления поверхности слитка.

Исследования процесса охлаждения слитков в условиях вакуума проводили для слитков титанового сплава Ti-6Al-4V диаметром 600...1100 мм и длиной 4 м. Моделировали полный цикл получения слитка, включая процесс его выплавки. В результате исследований получены температурные поля слитка для различных моментов времени, вплоть до охлаждения до значений температуры 400...450 °C (673...723 K), при которых в случае развакуумирования камеры окисление поверхности слитка незначительно [5].

В результате анализа температурных полей для слитков диаметром 600, 840 и 1100 мм установлено, что время охлаждения слитка прямо пропорционально его диаметру, в то время как продолжительность

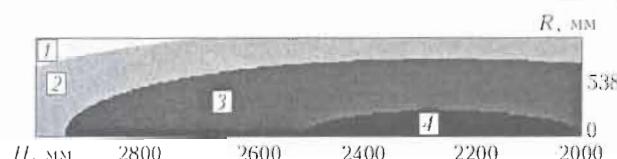


Рис. 3. Распределение температур в слитке титанового сплава Ti-6Al-4V диаметром 1100 мм после охлаждения при T , К: 1 — 700...723; 2 — 725...750; 3 — 750...775; 4 — 775...800

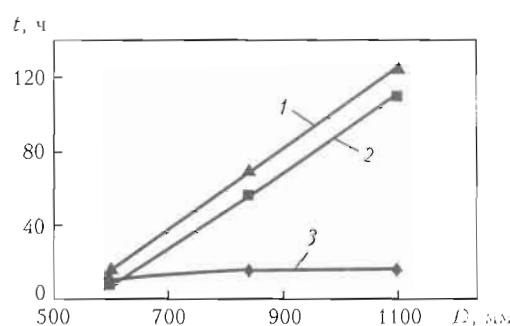


Рис. 4. Зависимость длительности плавки и охлаждения от диаметра слитка: 1 — общее время; 2 — продолжительность охлаждения; 3 — длительность плавки

плавки зависит от диаметра слитка значительно меньше, учитывая повышение производительности плавки с увеличением диаметра слитка (рис. 4).

Для слитков диаметром 840 и 1100 мм продолжительность охлаждения составляет соответственно более 50 и 100 ч, что представляется чрезмерным с технологической точки зрения. Так, для сравнения, время выплавки слитков не превышает 15 ч.

Выводы

- Показано, что выплавка крупногабаритных слитков титановых сплавов требует повышенного внимания к энергетическим аспектам ЭЛПЕ: расходу электроэнергии в процессе плавки и технике охлаждения слитков.

- Определено, что для крупногабаритных слитков диаметром 840 и 1100 мм охлаждение в условиях вакуума экономически невыгодно.

- Kuang O. Yu, Ashraf M. Imam development of titanium processing technology in the USA // Proc. of the 11th World conf. on Titanium (Kyoto, Japan, 3–7 June 2008). — 2008. — Vol. 1. — P. 9–16.
- Paton B. E., Zhuk H. V., Trygub M. P. Ingots crystallization in titanium sponge cakes electron beam direct melting // Ibid. — 2008. — Vol. 1. — P. 181–184.
- Fox S. P., Terlinden G. Titanium production technology: recent advances and future needs // Proc. of the 10th World conf. on titanium (Hamburg, Germany, 13–18 July 2003). — 2003. — Vol. 1. — P. 81–94.
- Ускоренное охлаждение слитков титана после ЭЛП / А. М. Касумов, Н. Ф. Наконечный, В. Н. Федоров, В. А. Щекин-Кротов // Современ. электрометаллургия. — 2003. — № 2. — С. 20–21.
- Титановые сплавы для морской техники / И. В. Горынин, С. С. Ушков, А. Н. Хатунцев, Н. И. Лошакова. — СПб: Политехника, 2007. — 387 с.

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

Поступила 17.09.2008



ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СПЛАВОВ ЦИРКОНИЯ В УКРАИНЕ

С. В. Ладохин, В. С. Вахрушева

Дан краткий анализ современного состояния технологий плавки циркония, изложены предложения по возможным направлениям развития циркониевого производства в Украине. Обосновывается перспективность применения электронно-лучевых металургической и литьевой технологий для этой цели.

Brief analysis of modern state of technologies of zirconium melting is given, proposals on possible trends of development of zirconium production in Ukraine are presented. The prospects of application of electron metallurgical and foundry technologies for this purpose are grounded.

Ключевые слова: цирконий; сплавы; губка; вакуумно-дуговая плавка; электронно-лучевая плавка; слиток; литья заготовка; ковка; прессование

В настоящее время на АЭС Украины эксплуатируются 15 энергоблоков, 13 из них — типа ВВЭР-1000, которые вырабатывают около половины электроэнергии страны. Ядерное топливо для этих блоков поставляется из России, поэтому абсолютная зависимость их работоспособности от внешних поставок угрожает энергетической безопасности государства. Попытки найти альтернативные источники ядерного топлива, в частности адаптировать к отечественным атомным блокам топливо фирмы «Вестингауз» (США), пока результатов не дали. Таким образом, проблема создания отечественного ядерно-топливного цикла (ЯТЦ) относится к числу важнейших, определяющих энергетическую независимость страны. Неотъемлемой составной частью этой проблемы является получение циркония ядерной чистоты и организация производства из него сплавов для изготовления защитных труб-оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), канальных и направляющих труб, кассет, дистанционирующих решеток и других деталей активной зоны атомных реакторов [1].

В связи с этим перед отечественными специалистами стоит задача выбора наиболее рационального с экономической точки зрения способа получения циркония, процесса рафинирующей плавки и формирования слитков сплавов требуемого состава с необходимым комплексом свойств металла, технологий получения трубных заготовок, изготовления из них защитных оболочек ТВЭЛ и других необходимых изделий.

В данной статье авторы предлагают свое видение путей решения этих задач с учетом опыта, накопленного в ходе выполнения Комплексной программы создания отечественного ЯТЦ [2] и последующих работ в этом направлении, выполняемых совместно с Национальным научным центром «Харьковский физико-технологический институт» НАН Украины и Государственным научно-производственным

предприятием «Цирконий» (г. Днепродзержинск) в основном по заданиям Минтопэнерго Украины.

В мировой практике для получения циркония наиболее широко используют способ магнийтермического восстановления из тетрахлорида циркония (способ Кроля) [3, 4]. В России для этой цели применяют способ электролитического восстановления из солей K_2ZrF_6 , KCl и KF [1, 3, 5], а в Украине на ГНПП «Цирконий» освоен способ кальцийтермического восстановления из тетрафторида циркония [3, 6]. При магнийтермическом способе исходный металл получают в виде губки, при электролитическом — в виде порошка, а кальцийтермическим — цилиндрической заготовки с малым отношением высоты к диаметру.

В первых двух случаях для последующего металлургического передела с получением слитков сплавов используют вакуумно-дуговой переплав (ВДП), для чего из губки и порошка изготавливают расходуемые электроды, в которые вводят соответствующие легирующие элементы.

Процесс получения слитков сплавов состоит из двух последовательных переплавов, в первом из которых решается проблема консолидации и рафинирования металла, а во втором — дополнительного рафинирования, томогенизации металла и формирования требуемой кристаллической структуры слитка. Полученные слитки подвергают ковке и другим способам механической, а также термической обработки с изготовлением трубных заготовок.

Полую трубную заготовку получают различными способами: механической обработкой на токарных и сверлильных станках, прошивкой сплошной или предварительно сверленой поковки с последующей механической обработкой.

Подготовка заготовок к горячему выдавливанию в большинстве случаев завершается укупоркой их в медную оболочку или нанесением на их поверхность электрохимическим способом слоя меди с последующим ее стравливанием либо удалением путем механической обработки. В ряде случаев ее остав-



ляют в качестве подсмазочного слоя для дальнейшей деформации. Следующей технологической операцией при производстве труб-оболочек является многократная холодная прокатка с промежуточными термообработками в вакууме.

Способом горячего прессования получают так называемые TREX-трубы (полые трубные заготовки для последующего передела), а из них при помощи холодной прокатки — трубы-оболочки ТВЭЛ [7]. Данную технологическую схему в настоящее время применяют все производители ядерного топлива в мире.

Цилиндрические заготовки циркония кальцийтермического восстановления рафинировать способом ВДП не представляется возможным, поскольку из них весьма сложно изготовить расходуемый электрод. Для рафинирования этих заготовок удобно использовать электронно-лучевую плавку с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ). Этот процесс освоен на ГНПП «Цирконий», где в печи ЭДП-07 переплавляют заготовки циркония кальцийтермического восстановления в слитки диаметром до 230 мм [8]. Многолетняя практика получения слитков циркония при ЭЛПЕ, а также последующее освоение электронно-лучевой гарнисажной плавки (ЭЛГП) с рафинированием металла в тиглях с электромагнитным перемешиванием (ЭМП) расплава на переносящей в литейную установку печи ЕМО-250 [9] обусловили в нашей стране накопление большого опыта электронно-лучевой плавки циркония, в отличие от других производителей этого металла в мире. Получаемые при этом слитки и заготовки из циркония ядерной чистоты могут быть использованы для выплавки сплавов и изготовления из них защитных оболочек ТВЭЛ и других необходимых изделий.

Исследования по получению из циркония кальцийтермического восстановления КТЦ-100 трубных заготовок проводили по двум технологическим схемам (рис. 1). Первая показывает технологию выплавки слитков двойным ВДП, вторая — технологию электронно-лучевой гарнисажной плавки с получением трубных заготовок способами литья. Первую схему реализовали в ННЦ «ХФТИ» НАН Украины [10], вторую — во ФТИМС НАН Украины совместно с ГНПП «Цирконий» [11]. В обоих случаях выплавляли сплав состава Zr—1Nb, из которого изготовили опытные партии труб-оболочек ТВЭЛ.

Слитки и литье заготовки получали с использованием тройной шихты, состоящей из циркония КТЦ-100, йодидного циркония (вводили в шихту до 30 % для снижения содержания кислорода в сплаве до требуемого по техническим условиям уровня) и ниobia [12]. TREX-трубы в обоих случаях изготавливали по разработанной в Государственном предприятии «Научно-исследовательский трубный институт» технологической схеме производства горячепрессованных труб [13]. Данная технология позволяет использовать вместо традиционной ковки высокотемпературное прессование литьих трубных заготовок в β-области с высокими степенями деформации и последующей закалкой с прокатного нагрева. Высокотемпературное прессование (коэффициенты вытяжки $\mu = 25 \dots 48$) способствует перекристаллизации литьей структуры заготовки и формированию однородной структуры мартенситного

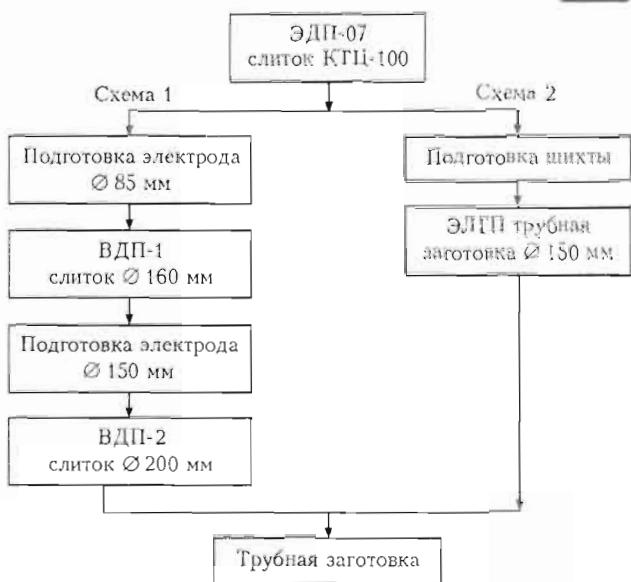


Рис. 1. Схемы получения трубных заготовок в проведенных экспериментах

типа. Металл заготовок, выплавленных с использованием электронно-лучевой плавки с применением ЭМП расплава, после прессования по разработанной технологии имеет достаточную технологическую пластичность для последующего холодного передела.

Изготовление из этого металла труб-оболочек ТВЭЛ показало, что по качественным показателям трубы соответствуют всем требованиям (технологических условий, стандартов ASTM) к трубам-оболочкам. Комплексная оценка качества этих труб подтвердила возможность использования данной технологии [10, 11, 14].

Следует отметить, что практическая постановка вопроса о получении трубных заготовок способами литья стала возможной после разработки указанной технологии производства горячепрессованных труб. Преимущества литейных технологий, по сравнению с традиционной, заключаются в сокращении количества технологических операций и отходов, отсутствии необходимости в дорогостоящем ковочном и механическом оборудовании, уменьшении насыщения металла кислородом.

В целом результаты проведенных исследований дают основание утверждать, что разработанные технологии получения циркония кальцийтермического восстановления, выплавки на его основе сплавов и изготовления из них защитных оболочек ТВЭЛ и других деталей активной зоны атомных реакторов позволяют решить задачи создания отечественного ЯТЦ или его элементов. Основная трудность здесь заключается в получении кальция высокой чистоты с достаточно низким содержанием кислорода, необходимого для реализации процесса кальцийтермического восстановления циркония, ранее поставляемого из России.

В последнее время при обсуждении перспектив и направлений развития циркониевого производства в Украине многие специалисты отдают предпочтение способу Кроля как более экономичному, по сравнению с другими способами восстановления циркония. При этом основными аргументами являются опыт других стран-производителей циркония,

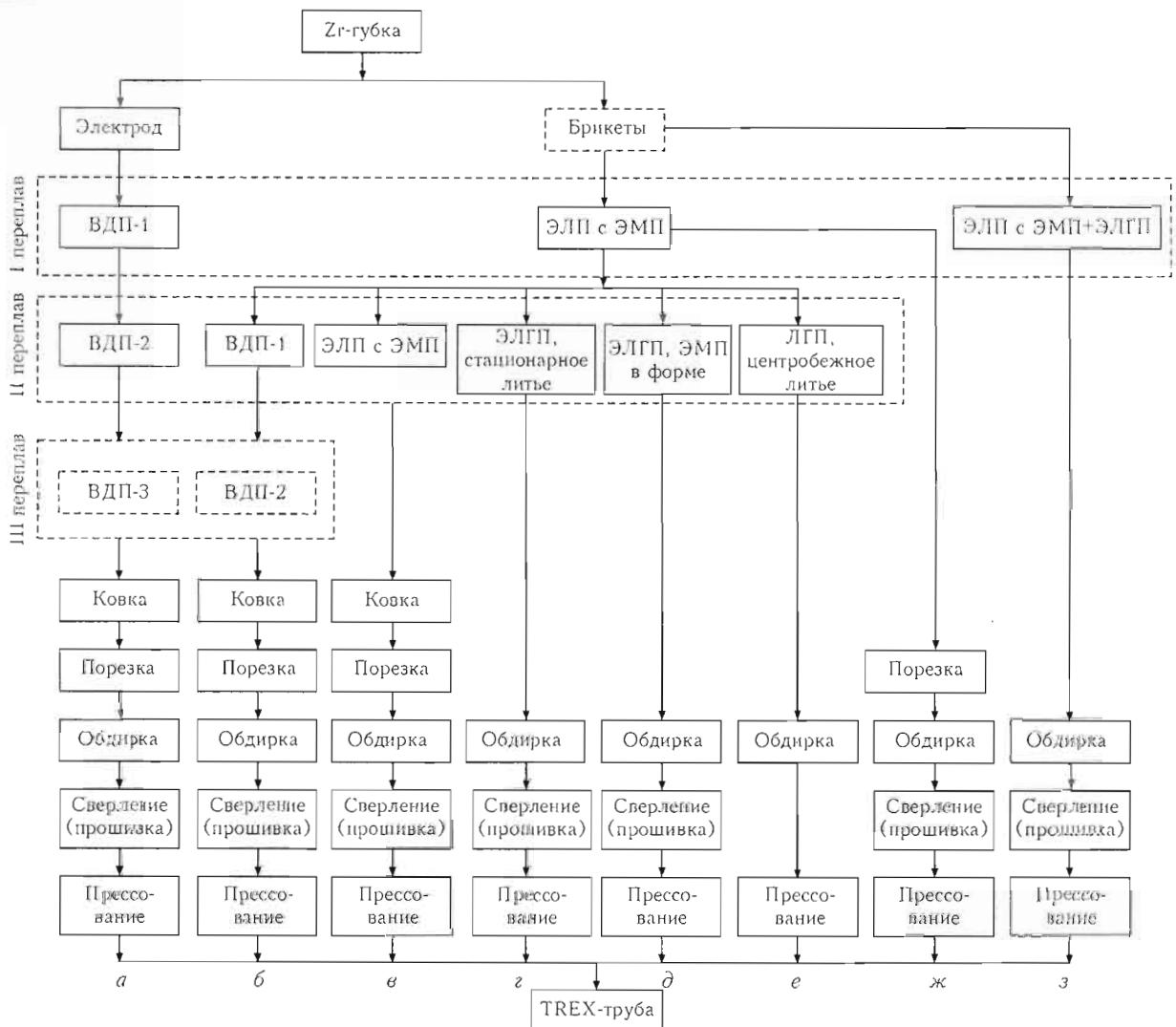


Рис. 2. Принципиальные технологические схемы получения трубных заготовок из сплавов циркония: а — традиционная с использованием ВДП; б, в — трубных заготовок из слитка второго переплава; г—е — литьих трубных заготовок с двукратным переплавом; ж — трубных заготовок из слитка первого переплава; з — литьих трубных заготовок с однократным переплавом

а также интенсивные работы в этом направлении в России [15].

В случае принятия такой позиции перед отечественными металлургами встанет проблема выбора наиболее рационального способа плавки и рафинирования губки циркония, получения заготовок для последующего передела в необходимые изделия, прежде всего в защитные оболочки ТВЭЛ, поскольку в Украине отсутствует технология ВДП циркония. Для ее создания требуется не только время, но и большие финансовые вложения. В то же время в стране накоплен уникальный опыт ЭЛП этого металла, который целесообразно использовать. Безусловным преимуществом ЭЛП является более эффективное рафинирование, в том числе от примесей внедрения [16], удаление которых из циркония при ВДП связано с серьезными затруднениями.

На рис. 2 приведены возможные варианты технологических схем получения TREX-труб, которые могут быть реализованы на практике при создании отечественного ЯТЦ. Эти схемы учитывают возможность получения трубных заготовок как из слитков, так и способами литейной технологии.

Схема на рис. 2, а представляет собой традиционный технологический процесс с использованием для получения слитков ВДП расходуемых электродов, изготавляемых из губки. Как правило, проводится два переплава — рафинирующий и гомогенизирующий, но на практике иногда бывает три и более [17]. Такой процесс в настоящее время используют во всех странах, имеющих циркониевое производство. В России исходный цирконий получают способом электролитического восстановления в виде порошка, для рафинирования и гомогенизации которого с формированием слитков также применяют двукратный ВДП.

Все другие схемы на рис. 2 описывают варианты с использованием ЭЛП. Авторы являются сторонниками реализации в Украине одной из этих схем, однако в настоящее время затруднительно установить наиболее перспективную. Это связано с тем, что в приведенных схемах предлагаются некоторые технические решения, пока не прошедшие экспериментальную проверку либо прошедшие ее в ограниченном масштабе. Это обусловило необходимость обоснования целесообразности их применения с учетом опыта, имеющегося при плавке других металлов.



Все эти схемы предусматривают проведение первого переплава с формированием слитка в электронно-лучевых установках с промежуточной емкостью, что представляется целесообразным с учетом высокой рафинировочной способности этого процесса. В качестве шихты используют губку, которую прессуют в брикеты.

В практике циркониевого производства опыта ЭЛП губки пока нет, но такой опыт в нашей стране накоплен при производстве титана. Полученные данные подтверждают перспективность этого подхода [18]. Заслуживает внимание и возможность плавки не губки, а непосредственно крицы, образующейся при магнитермическом восстановлении. Плавку последней в электронно-лучевых установках интенсивно исследуют в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины при получении титана [19].

Поскольку плавка губки сопровождается интенсивным газовыделением, важным становится вопрос о выборе наиболее рациональных источников нагрева, т. е. электронно-лучевых пушек. Этому вопросу всегда уделяли много внимания, о чем свидетельствует рассмотрение конструкций пушек практически во всех монографиях по ЭЛП, в том числе опубликованных в последнее время [11, 18, 20].

Среди исследований в этом направлении следует выделить работу [21], посвященную анализу состояния разработки и применения пушек различного типа для ЭЛП, включая компактные аксиальные электронно-лучевые нагреватели нового поколения. В рассматриваемом случае в качестве источника нагрева целесообразно использовать пушки высоковольтного тлеющего разряда (ВТР), которые в свое время разрабатывались специально для плавки газонасыщенных материалов [22] и работоспособность которых в нашей стране проверена и при плавке губчатого титана [23, 24].

Другой принципиальной особенностью предлагаемого первого переплава является проведение процесса с ЭМП расплава при формировании слитка в кристаллизаторе, которое в данном случае используется с целью интенсификации процессов рафинирования. В практике ЭЛП применение ЭМП расплава для этой цели известно только при рафинировании ниобия [11]. Полученные положительные результаты свидетельствуют о целесообразности проведения специальных исследований в этом направлении также при ЭЛП губки циркония.

Схема на рис. 2, б отображает вариант, при котором второй переплав слитка ЭЛП первого переплава проводится в вакуумно-дуговой печи, т. е. по традиционной для получения слитка циркония технологии. Именно эта схема проверена в исследованиях ННЦ «ХФТИ» [10].

Схема на рис. 2, в предусматривает использование при обоих переплавах ЭЛП с ЭМП расплава в кристаллизаторе. При этом основная задача использования ЭМП при втором переплаве заключается в улучшении кристаллической структуры металла. Как и в рассмотренном случае применения перемешивания для интенсификации процессов рафини-

рования, имеющийся в настоящее время экспериментальный материал по наложению электромагнитных полей при формировании слитка циркония достаточно ограничен [11], что также указывает на необходимость проведения дополнительных исследований в этом направлении. Об эффективности использования электромагнитных воздействий для улучшения структуры свидетельствует опыт получения слитков стали, алюминия, магния [25, 26].

Преимуществом данной схемы является исключение из технологической цепочки ВДП, который по эффективности рафинирования уступает ЭЛП.

Во всех трех рассмотренных вариантах технологических схем полученные слитки в последующем проходят идентичные операции ковки и других способов обработки для изготовления ТРЕХ-труб.

Схемы на рис. 2, г–е отображают варианты получения трубных заготовок с использованием способов литейной технологии литьем в кокиль и металлическую форму с наложением электромагнитных полей на расплав в форме и центробежным литьем. Во всех этих вариантах металл проходит двукратную ЭЛП: первая плавка — при переплаве брикетов губки в слиток, вторая — в гарнисажной емкости с ЭМП расплава и последующим литьем трубных заготовок. Преимуществом всех этих схем является исключение из технологического процесса ковки, сопровождающейся не только заметными потерями металла, но и насыщением его кислородом. Применение ЭМП расплава в гарнисажном тигле гарантирует накопление требуемой массы расплава в тигле, обеспечивает возможность выплавки многокомпонентных сплавов, сокращает удельный расход электроэнергии и потери металла испарением.

Результаты экспериментальной проверки указанных схем изложены в работе [11]. Но поскольку в настоящее время в стране не производят циркониевую губку, в качестве исходного металла в проводившихся экспериментах использовали цирконий кальцийтермического восстановления, первый переплав которого проводят в электронно-лучевой печи с промежуточной емкостью [6]. Это же относится и к схеме на рис. 2, б, проверенной в работах ННЦ ХФТИ [10].

Схемы на рис. 2, ж, з относятся к разработкам, которые следует рассматривать как перспективные. Для их экспериментальной проверки необходимо проведение специальных исследований, причем только с использованием губки. Особенность обеих схем заключается в том, что слиток для изготовления трубных заготовок получают однократным электронно-лучевым переплавом губки (схема ж) или литье заготовок выполняют также после однократной плавки губки (схема з). Такой подход представляется возможным, поскольку ЭЛПЕ позволяет осуществлять процесс рафинирования с любой необходимой скоростью. О перспективности работ в этом направлении может свидетельствовать проведение в США исследований по получению слитков сплава титана Ti-6Al-4V с однократным электронно-лучевым переплавом титановой губки [27]. Вероятно, что в качестве источников нагрева при ре-



ализации рассматриваемых схем предпочтительно использовать пушки ВТР.

Поскольку в настоящее время в мировой практике отсутствует опыт плавки губки циркония в электронно-лучевых печах, для экспериментальной проверки изложенных предложений целесообразно до создания ее отечественного производства приобрести необходимое для таких исследований количество губки в странах, где налажено промышленное производство этого материала (США, Франция, Индия и др.). Сами исследования могут быть проведены во ФТИМС и на ГНПП «Цирконий». В этих организациях имеется необходимое оборудование и накоплен опыт ЭЛП циркония.

Заслуживает внимания еще один вопрос, касающийся получения и рафинирования ниобия. Этот металл является основным легирующим элементом в использующихся в нашей стране сплавах циркония, который Украина приобретает за рубежом. В то же время в стране имеются запасы ниобиевого сырья, а необходимость в организации производства высокочистого ниobia возникнет не только при получении сплавов для ЯТЦ, но и в связи с тем, что в ближайшем будущем перед нашей страной встанет проблема получения сверхпроводящих материалов, в изготовлении которых ниобий высокой чистоты играет определяющую роль [28].

В заключение отметим, что авторы отдают предпочтение технологиям, в которых трубные заготовки из сплавов циркония получают способами литья в электронно-лучевых установках, а изготовление TREX-труб осуществляют по схеме высокотемпературного прессования в β -области с использованием деформации больших степеней при прессовании и закалке с прокатного нагрева, что исключает из технологического процесса ковку. Однако, учитывая, что среди специалистов однозначного мнения по этим вопросам нет, представляется целесообразным провести их всестороннее обсуждение с тем, чтобы выработать рекомендации по наиболее рациональному пути решения поставленной проблемы.

1. Займовский А. С., Никулина А. В., Решетников Н. Г. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. — М.: Энергоиздат, 1994. — 256 с.
2. Исследования и разработки по развитию производства циркониевых сплавов и изделий в Украине / А. П. Чернов, Г. Р. Семенов, В. И. Лапшин и др. // Труды 14-й Междунар. конф. по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению (Алушта, Крым, 12–17 июня 2000 г.). — Харьков: НИЦ ХФТИ, 2000. — С. 98–100.
3. Цирконий и его сплавы: технология производства, области применения / В. М. Ажака, П. Н. Выгов, С. Д. Лавриненко и др. — Харьков: НИЦ ХФТИ, 1998. — 89 с.
4. Черняева Т. П., Стукало А. И., Грицина В. М. Кислород в цирконии. — Харьков: НИЦ ХФТИ, 1999. — 112 с.
5. Production of Zirconium Alloys and Zirconium Alloys Components in Russia / V. M. Arjakova, S. F. Fedotov, E. I. Popov et al. // Proc. conf. «Electron beam melting and refining-state of the art 1995». — Englewood, NJ, 1995. — P. 209–214.
6. Производство циркония и гафния на ПО ПХЗ для удовлетворения потребностей атомной энергетики Украины / Ю. Ф. Коровин, В. К. Чуприенко, К. А. Лицдт и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. — 1994. — № 2. — С. 114–124.
7. Технология изготовления изделий из циркониевых сплавов для атомной энергетики и некоторые свойства сплавов циркония / В. М. Ажака, В. С. Вахрушева, Т. А. Дергач и др. — Харьков: НИЦ ХФТИ, 1999. — 115 с.

8. Получение высокочистых циркония и гафния / М. Л. Коцарь, В. М. Ажака, М. И. Борисов и др. // Высокочистые вещества. — 1992. — № 4. — С. 85–92.
9. Получение литых трубных заготовок из сплавов циркония в электронно-лучевых установках / С. В. Ладохин, В. Г. Шмидтдин, В. Б. Чернявский, Н. И. Матюшенко // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. — 1999. — № 2. — С. 21–27.
10. Виробництво партії трубних заготовок трекс-труб та виготовлення дослідно-промислової партії твердих труб зі сплаву Zr1Nb із вітчизняної сировини / В. М. Ажака, Б. В. Борц, І. М. Бутенко та ін. // Наука та інновації. — 2006. — № 6. — С. 18–30.
11. Електронно-лучевая плавка в литейном производстве / С. В. Ладохин, Н. И. Левицкий, В. Б. Чернявский и др. — Киев: Сталь, 2007. — 62 с.
12. Виплавка цирконієвого сплава КТЦ110 з використанням комбінованої шихти та отримання слитків в електронно-лучевих установках / В. Б. Чернявський, Т. В. Лапшиук, А. С. Гладков та ін. // Процесси ліття. — 2005. — № 4. — С. 53–59.
13. Вахрушева В. С. Формування структури та властивостей сталі і сплавів при виготовленні труб для ядерних енергетичних установок: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Дніпропетровськ, 2003. — 36 с.
14. Вахрушева В. С., Сухомлин Г. Д., Дергач Т. А. Комплексна оцінка якості виготовлених в Україні перших оптических партій труб-оболочек ТВЭЛ зі сплава Zr1Nb // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. — 1999. — № 2. — С. 27–32.
15. Современное состояние и перспективы развития производства циркония и его сплавов и изделий из них / А. К. Шиков, А. Д. Никулин, А. В. Никулина и др. // Физика и химия обраб. материалов. — 2001. — № 6. — С. 5–14.
16. Электронно-лучевая плавка циркония / В. М. Ажака, П. Н. Выгов, С. Д. Лавриненко и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. — 2000. — № 5. — С. 3–11.
17. Nuclear Fuel Complex // Bulletin. — Hyderabad, India, 2001–2002. — 62 р.
18. Электронно-лучевая плавка титана / Б. Е. Патон, Р. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. — Киев: Наук. думка, 2006. — 248 с.
19. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В. Получение титановых слитков из недробленых блоков губчатого титана методом электронно-лучевой плавки // Тр. междунар. конф. «Титан–2005 в СНГ» (Киев, 22–25 мая 2005 г.). — Киев, 2005. — С. 294–295.
20. Электронно-лучевая плавка / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 266 с.
21. Robert McKoon. Design and Application of Electron Beam Guns // Electron Beam Melting and Refining-State of the art 2000: Proc. conf. — Englewood, NJ, 2000. — P. 103–113.
22. Удрик Я. Я., Чернов В. А. Электронная пушка высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) как стабильный источник нагрева при повышенном газовыделении // Спец. электрометаллургия. — 1981. — Вып. 46. — С. 73–79.
23. Electron Beam Melting Titanium Sponge Using High-Voltage Glow Discharge Guns / A. L. Tikhonovskii, N. K. Laschuk, A. A. Tur et al. // Advances in Spec. Electrometallurgy. — 1993. — № 10. — P. 70–73.
24. International Company Antares // Бюллетень. — Киев, 2002. — 10 с.
25. Самойлович Ю. А. Кристаллизация слитка в электромагнитном поле. — М.: Металлургия, 1986. — 168 с.
26. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Технологии современной металлургии. — М.: Новые технологии, 2004. — 784 с.
27. Wood J. R. Producing Ti-6Al-4V Plate from Single-Melt EBCHM Ingot // JOM. — 2002. — № 2. — P. 56–58.
28. Ниобий и tantal / А. Н. Заликман, Б. Г. Коршунов, А. В. Елютин, А. М. Захаров. — М.: Металлургия, 1990. — 296 с.

Физико-технолог. ин-т металлов и сплавов

НАН Украины, Киев

ГП «Науч.-исслед. и конструк.-технолог. ин-т трубн. пром-сти им. Я. Е. Осады», Днепропетровск

Поступила 18.04.2008



УДК 620.197

СТРУКТУРА И КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ И МОЛИБДЕНА, ПОЛУЧЕННЫХ СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

В. Г. Гречанюк, В. А. Денисенко

Продемонстрировано, что повышение температуры подложки до 900 °C позволяет получить конденсированные материалы на основе меди с большим содержанием молибдена. Изучена структура композиционных материалов и показано, что распределение компонентов по толщине конденсата имеет неоднородный характер. Установлено, что с увеличением содержания молибдена в образцах коррозионное разрушение увеличивается на участках с дефектами структуры.

It was demonstrated that increase in substrate temperature up to 900 °C allows producing condensed copper-based materials with a high content of molybdenum. Structure of composite materials was studied and it is shown that the distribution of components across the condensate thickness has a non-uniform nature. It was established that with increase in molybdenum content in samples the corrosion fracture is increased at the regions with structure defects.

Ключевые слова: коррозионная стойкость; композиционные материалы; электронно-лучевая технология; структура

В последнее время для изготовления электрических контактов широко применяются конденсированные из паровой фазы композиционные материалы на основе меди и молибдена [1–3]. Указанные материалы с концентрацией молибдена до 12 мас. % используются в контактах переменного и постоянного токов до 1000 А. Попытки получить подобные материалы с большей концентрацией молибдена на вращающейся со скоростью 38 об./мин подложке при температуре осаждения (700 ± 30) °C успеха не имели. В таких конденсатах фиксировалось хрупкое разрушение еще в процессе осаждения.

В то же время представляет интерес получение конденсированных материалов на основе меди и молибдена с большей концентрацией молибдена и расширение возможностей применения этих композиций в диапазоне токов свыше 1000 А.

Композиционные материалы Cu–Mo получали на стационарной подложке, изготовленной из стали Ст3 размерами 250×220×10 мм при повышенной температуре (900 ± 30) °C путем электронно-лучевого испарения и последующей конденсации в вакууме по технологической схеме, представленной на рис. 1.

Данная технологическая схема позволила формировать конденсированные композиции с градиен-

том по концентрации молибдена от 0 до 32,5 мас. % (остальное медь).

Коррозионную стойкость конденсатов исследовали гравиметрическим методом [4]. Образцы площадью 100 мм^2 после предварительной обработки помещали в коррозионную среду (воду) на 100 ч. Контроль за изменением массы образцов осуществляли через каждые 20 ч. Исследования проводили

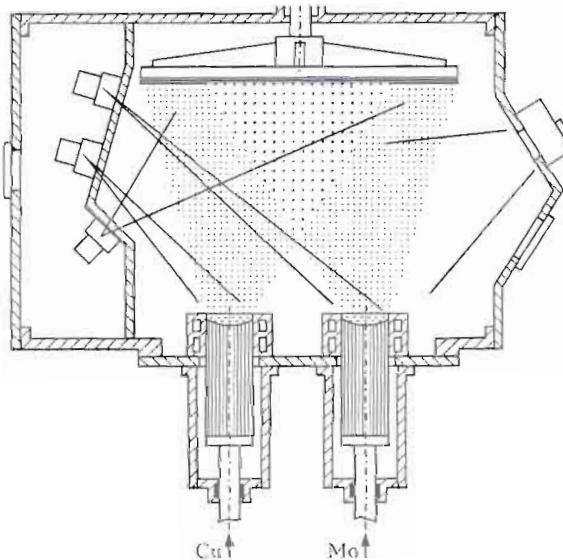


Рис. 1. Схема получения композиционных материалов Cu–Mo

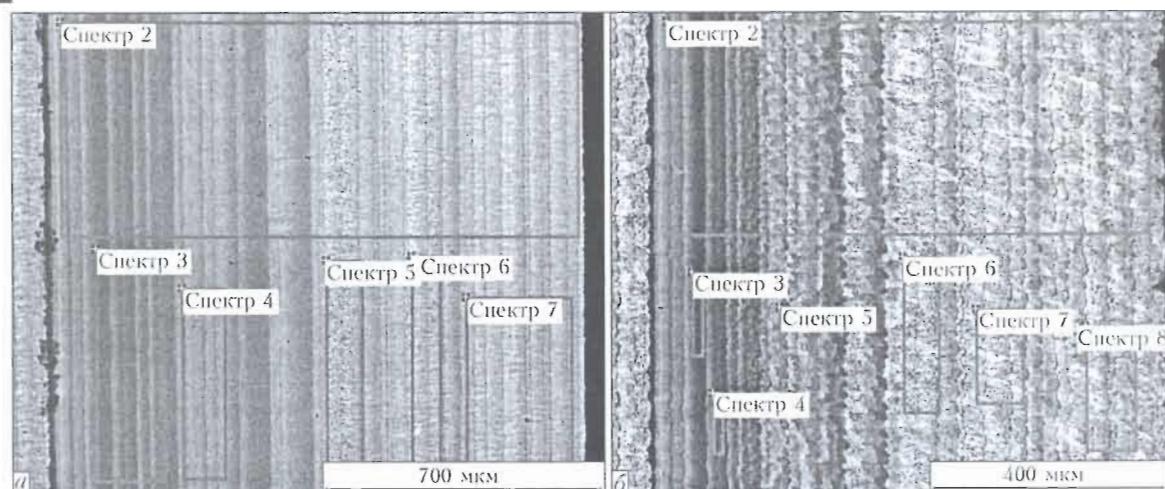


Рис. 2. Структура конденсата Cu-Mo по толщине с концентрацией молибдена 12,43 (а) и 40,36 мас. % (б)

в статическом режиме. Гравиметрические исследования дополняли определением состава коррозионной среды до и после проведения коррозионных испытаний, а также электронно-микроскопическими исследованиями.

Изучение химического состава конденсатов показало, что в стационарных условиях получения материалов их химический состав является неоднородным по толщине конденсата (рис. 2, а, таблица).

Усредненный химический состав по толщине конденсата показал, что содержание молибдена составляет 12,43 мас. %. В то же время распределение компонентов на отдельных участках по толщине конденсата носит неоднородный характер и колеб-

ляется от 3,81 до 20,24 мас. % (рис. 2, а, таблица). О неоднородности распределения компонентов свидетельствуют данные, приведенные на рис. 3.

Анализ распределения компонентов в области минимального содержания молибдена показал, что существует неоднородность по молибдену даже в относительно узкой области. Так, на глубине 50 мкм она колеблется от 0,11 до 3,89 мас. % молибдена.

Структура конденсатов носит четко выраженный макрослойный характер. Размер слоев колеблется от нескольких десятков микрон до нескольких сотен. Границы макрослоев четкие, без видимого искажения, обусловленного шероховатостью подложки (рис. 2, а). В то же время микрослойность, обнаружен-

Химический анализ спектров конденсата Cu-Mo			
№ спектра	Массовая доля элементов, %		Источник
	Cu	Mo	
2	87,57	12,43	Рис. 2, а
3	96,19	3,81	
4	86,96	13,04	
5	79,76	20,24	
6	81,82	18,18	
7	84,02	15,98	
2	59,64	40,36	Рис. 2, б
3	94,89	5,11	
4	88,19	11,81	
5	61,18	38,82	
6	47,33	52,67	
7	46,47	53,53	
8	53,12	46,88	
1	5,87	54,13	Рис. 5
2	45,33	54,67	
3	35,24	64,76	
4	92,69	7,31	
5	21,31	78,69	
6	20,86	79,14	
7	16,78	81,22	

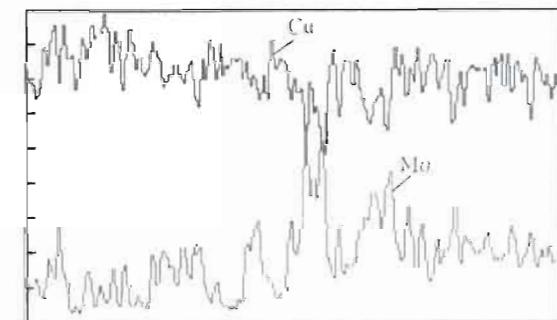


Рис. 3. Распределение компонентов меди и молибдена по толщине конденсата со средней концентрацией молибдена 12,43 мас. %

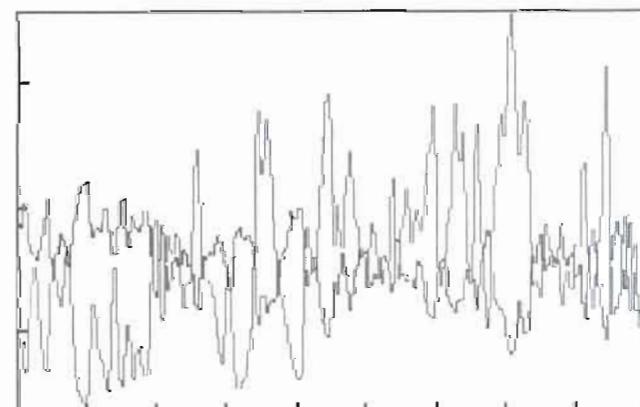


Рис. 4. Распределение меди и молибдена по толщине конденсата с концентрацией молибдена 40,36 мас. %

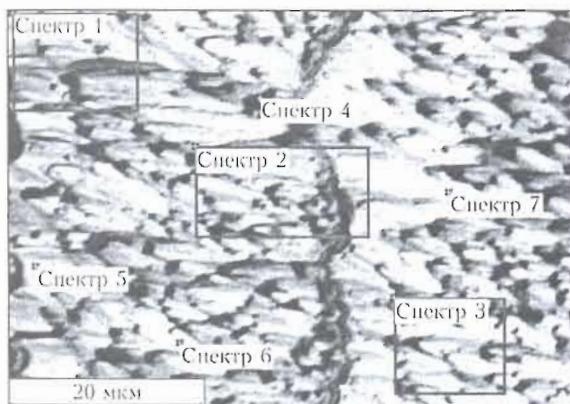


Рис. 5. Структура конденсата в области повышенного содержания молибдена

ная ранее в конденсированных материалах, полученных на врачающейся подложке, не выявлена.

Увеличение концентрации молибдена по усредненному химическому составу от 12,43 до 40,36 мас. % приводит к существенному изменению макроструктуры конденсаторов (рис. 2, б, таблица). Границы между макрослоями в этом случае носят волнистый характер. Степень неоднородности распределения молибдена и меди в макрослоях возрастает.

Распределение компонентов на толщине конденсата Cu – 40,36% Mo иллюстрирует рис. 4.

Для областей с максимальным содержанием молибдена характерна нечетко выраженная столбчатая структура с превалирующим содержанием молибдена (светлое поле) и повышенной концентрацией меди (темное поле) (рис. 5).

Электронно-микроскопические исследования конденсаторов, проведенные после коррозионных испытаний, показали, что при небольших концентрациях молибдена разрушение поверхности образцов не происходит, исключение составляют только участки с дефектами структуры, обусловленными теплофизическими условиями осаждения парового потока (рис. 6, а, б). При увеличении концентрации молибдена разрушение поверхности усиливается и на отдельных участках достигает 20 мкм (рис. 6, в).

Выводы

1. Определено, что повышение температуры подложки от 700 до 900 °С при совместной конденсации меди и молибдена на стационарную стальную подложку позволяет получать конденсированный материал на основе меди и молибдена с повышенным содержанием молибдена.

2. Показано, что для конденсаторов Cu–Mo, полученных в стационарных условиях осаждения, характерны макрослои с хаотическим распределением по толщине конденсата.

3. Коррозионные разрушения конденсаторов Cu–Mo, помещенных в дистиллированную воду, зафиксированы в участках поверхности, на которой имеются

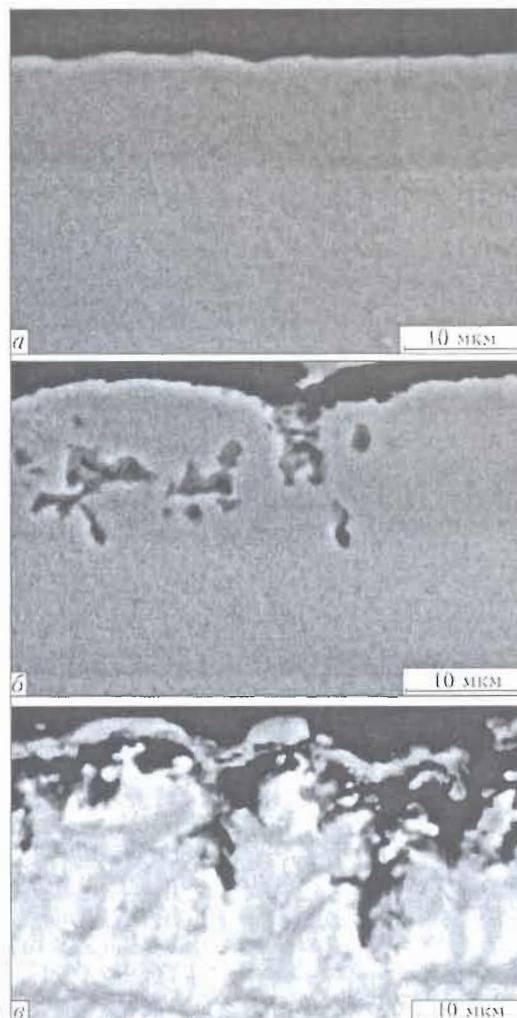


Рис. 6. Коррозионные повреждения образцов при следующих концентрациях молибдена: а, б – малых (12,43 %); в – больших (40,36 %)

структурные дефекты, связанные с металлургическими (технологическими) условиями их получения.

1. Конденсированные из паровой фазы композиционные материалы на основе меди и молибдена для электрических контактов. Структура, свойства, технология. Современное состояние и перспективы применения технологии электронно-лучевого высокоскоростного испарения-конденсации для получения материалов электрических контактов. Сообщение 1 // И. Н. Гречанюк, В. А. Осокин, И. Н. Гречанюк, Р. В. Минакова // Современ. электрометаллургия. – 2005. – № 2. – С. 28–35.
2. Разрушение композиционного материала Cu–Mo–Y–Zr в водных средах // И. Н. Гречанюк, В. Г. Гречанюк, И. Ф. Руденко, Т. Н. Свиридова // Электрические контакты и электроды. – Киев: Наук. думка, 1999. – С. 125–134.
3. Коррозия композиционных материалов на основе меди, используемых для электрических контактов / И. Н. Гречанюк, В. Г. Гречанюк, Б. М. Емельянов, И. Ф. Руденко // Там же. – Киев: Наук. думка, 1998. – С. 140–144.
4. Унифицированная методика лабораторных испытаний эффективности ингибиторов коррозии в водных системах. – Рига: Ин-т неорг. химии АН Латв. ССР, 1980. – 29 с.

Киев. нац. ун-т стр-ва и архитектуры, Киев

Поступила 08.11.2007



ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 669.187.56.001.1

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УКРУПНЕНИЯ СЛИТКОВ ИЗ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКИ ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ В ТОКОПОДВОДЯЩЕМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

В. И. Махненко, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко,
Т. В. Королева, А. А. Полищко

Представлены результаты математического моделирования процессов укрупнения слитков из высоколегированных сталей и сплавов, чувствительных к сегрегации, путем последовательной электрошлаковой наплавки жидким металлом (ЭШН ЖМ) в токоподводящем кристаллизаторе. Определены характерные параметры двухфазной зоны модельных слитков диаметрами 350; 520 и 690 м, полученных путем последовательной наплавки по схеме вытяжки способом ЭШН ЖМ слоев металла из сплава Инконель 718 на исходный центральный слиток диаметром 180 мм из этого же сплава, свидетельствующие о перспективности нового процесса ЭШН ЖМ укрупнения слитков из высоколегированных сталей и сплавов, чувствительных к сегрегации.

Results of mathematical modeling of the processes of enlargement of ingots of high-alloy steels and alloys, susceptible to segregation, by a successive electroslag cladding using a liquid metal (ESC LM) in a current-carrying mould are given. Typical parameters are determined of two-phase zone of model ingots of diameters 350, 520 and 690 mm, produced by a successive cladding by a scheme of withdrawal by the ESC LM of metal layers of Inconel 718 alloy on initial central ingot of 180 mm diameter of the same alloy, proving the prospects of the new process of ESC LM for enlargement of ingots of high-alloy steels and alloys, susceptible to segregation.

Ключевые слова: высоколегированные стали и сплавы; сегрегация; укрупнение слитков Инконель 718ЭШП; электрошлаковая наплавка жидким металлом; токоподводящий кристаллизатор; пятнистая ликвация; градиент температур; двухфазная зона; максимальный размер карбидов; расстояние между осями вторичных карбидов

Введение. Обеспечение высокого качества крупных стальных изделий традиционно связано с обеспечением однородности структуры и химического состава исходных поковок и требуемой степени укова для исправления дефектов слитков (сегрегации и пористости). Требования к качеству поковок в значительной мере зависят от их химического состава и области применения.

Одной из проблем современной энергетики при изготовлении низких ступеней ядерных турбин является получение деталей с высокими эксплуатационными свойствами, например дисков большого

диаметра для компрессоров. Для деталей такого назначения используют жаропрочные суперсплавы на никелевой основе.

Наиболее часто для изготовления дисков применяют поковки из сплава Инконель 718, склонного к пятнистой ликвации и образованию дефектов типа фрекелс, не устраляемых при деформации и термической обработке. Наличие последних существенно ограничивает возможность получения заготовок для производства дисков большого диаметра путем осадки слитка до заготовки диаметром $D_3 = nD_0$, где $n > 3$ [1]. Для их изготовления используют разнообразные способы переплава, включающие как двойной ВИП + ЭШП или ВИП + ВДП, так и тройной ВИП + ЭШП + ВДП переделы. Применение традиционных переплавочных процессов также не способствует решению проблем изготовления

© В. И. МАХНЕНКО, Л. Б. МЕДОВАР, В. Я. САЕНКО, Т. В. КОРОЛЕВА, А. А. ПОЛИШКО, 2008

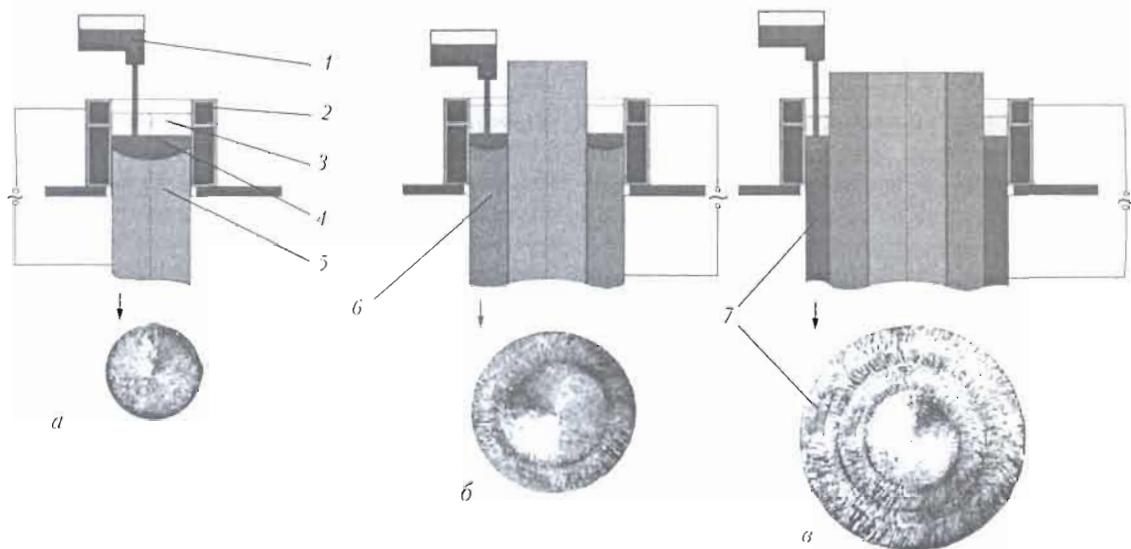


Рис. 1. Схема укрупнения слитков способом ЭШН ЖМ в токоподводящем кристаллизаторе (верхний ряд) и схематическое изображение поперечного сечения исходного слитка (а), после одно- (б) и двукратной (в) ЭШН: 1 — заливочное устройство для подачи жидкого металла в кристаллизатор; 2 — токоподводящий кристаллизатор; 3 — шлаковая ванна; 4 — металлическая ванна; 5 — центральный слиток; 6 — слой металла после однократной наплавки; 7 — металл второго слоя наплавки

крупных слитков из сплавов на никелевой основе при увеличении их диаметра в случае ВДП более 1000 мм, существующих схем ЭШП более 700 мм [2].

Принципиально новые возможности при производстве крупных кузнецких слитков для поковок роторов и дисков мощных современных паровых и газовых турбин из высоколегированных сталей и сплавов, а также другой крупнотоннажной машиностроительной продукции открывает разработанный в ИЭС новый технологический процесс получения сверхкрупных стальных слитков способом ЭШН ЖМ [3, 4], базирующийся на одно- или многократной кольцевой электрощлаковой наплавке на центральный слиток металла аналогичного химического состава и обеспечении однородной структуры в наплавленном слитке (рис. 1).

Процесс ЭШН ЖМ включает установление вертикально центрального слитка с заданным зазором в охватывающий его короткий токоподводящий кристаллизатор, ограничение зазора снизу с помощью кольцевого поддона с затравкой. В процессе ЭШН ЖМ при относительном встречном перемещении слитка и кристаллизатора путем частичного оплавления центрального слитка с применением короткого токоподводящего кристаллизатора и жидкого металла, подаваемого в плавильное пространство, формируется слиток, диаметр которого больше диаметра исходного центрального слитка на значение, равное удвоенному заданному зазору.

При применении процесса ЭШН ЖМ объем металлической ванны значительно меньше, чем у слитка аналогичного диаметра, выплавляемого по канонической схеме ЭШП, а протяженность двухфазной зоны твердожидкого состояния при затвердевании наплавляемых слоев металла существенно меньше, чем у обычных слитков ЭШП. Кроме того, центральный слиток при последовательной ЭШН каждого слоя играет роль макрохолодильника, отбира-

ющего тепло и положительно влияющего на форму металлической ванны и структуру наплавляемого металла. В результате создаются благоприятные условия для получения крупных слитков ЭШН ЖМ, свободных от пятнистой ликвации, практически любого заданного сечения.

Естественно, что для промышленной реализации важен выбор рациональных параметров процесса: толщины наплавляемого *i*-го слоя H_i , вертикальной

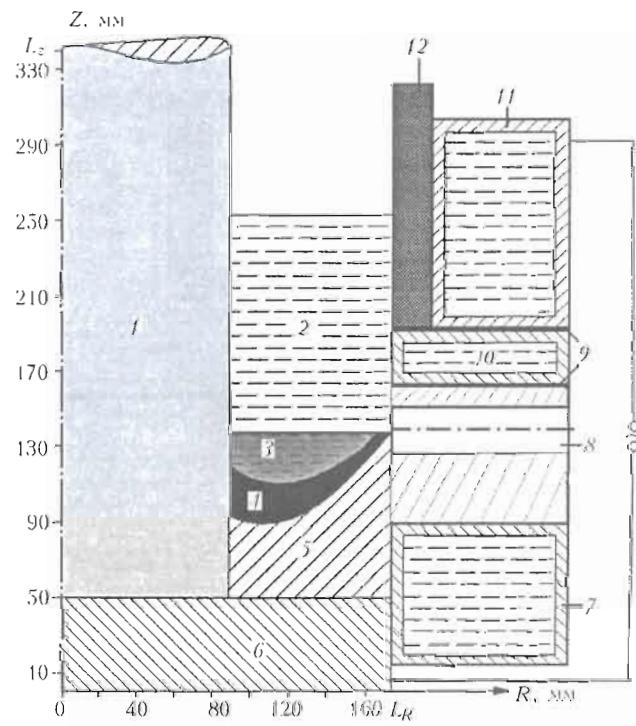


Рис. 2. Принятая схема для моделирования процесса ЭШН: 1 — центральная заготовка, подвергаемая наплавке; 2 — ванна жидкого металла; 3 — металлическая ванна; 4 — двухфазная зона; 5 — наплавляемый слой; 6 — затравка; 7, 10 — водоохлаждаемые секции; 8 — канал датчика уровня металлической ванны; 9 — изолятор; 11 — токоподводящая секция кристаллизатора; 12 — графитовая футеровка



скорости процесса для каждого слоя v_i , высоты шлаковой ванны $h_{ш}$, размеров токоведущего кристаллизатора (рис. 2) и соответствующих энергетических параметров от источника питания (напряжение U и ток I), которые меняются во времени. Получение таких данных экспериментальным путем требует больших затрат, особенно с учетом стоимости материала и электрической энергии.

Заслуживает внимания применение математического моделирования для получения важной информации относительно рациональных параметров рассматриваемого процесса ЭШН ЖМ в производстве слитков большого диаметра из высоколегированных сталей и сплавов.

За прошедшие годы развитие вычислительной техники существенно расширило возможности математического моделирования различных процессов получения слитков на основе ЭШП [5–9], которые авторы статьи использовали при проведении настоящих исследований.

Математическая модель процесса. Математическая модель процесса ЭШН ЖМ состоит из нескольких задач, математическая формулировка которых соответствует следующим характерным физическим явлениям, связанным друг с другом [7]:

определение поля электрического потенциала в жидкой шлаковой ванне и соответствующего тепловыделения;

расчет температурного поля в шлаковой и металлической ваннах с учетом порционного поступления жидкого присадочного металла;

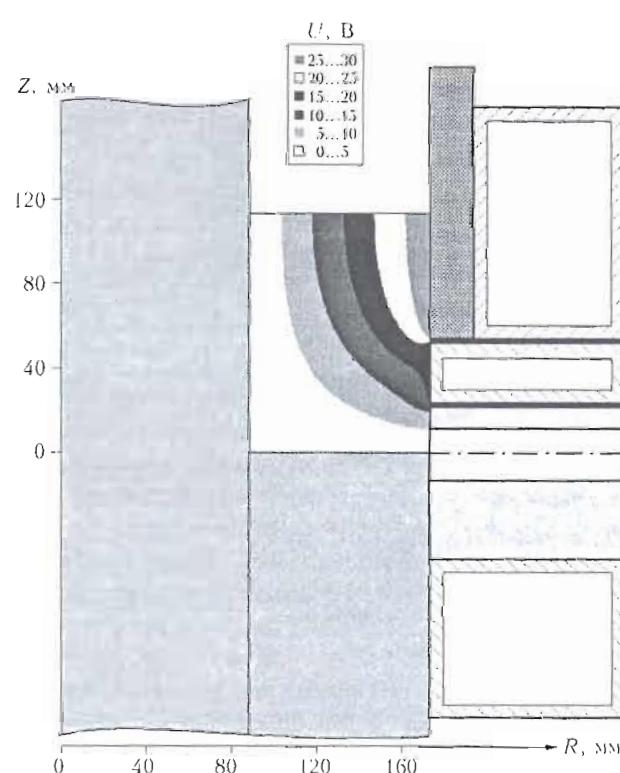


Рис. 3. Распределение потенциала $U(r,z)$ в области шлаковой ванны

определение параметров двухфазной зоны, на основе которых можно, согласно работам [9–11], судить о степени неблагоприятного проявления ликвационных процессов в слитке.

Электрический потенциал и тепловыделение в шлаковой ванне. Распределение электрического потенциала $P(r,z,t)$ в шлаковой ванне определяли при допущении осевой симметрии области решения и при заданной разности потенциалов между внутренней поверхностью графитовой футеровки 7 (рис. 2) и металлической ванной 4, а также наплавляемой поверхностью заготовки 1. При этом потенциал на поверхностях 4 и 1 равнялся 0, а распределение электрического потенциала в шлаковой ванне определяли в результате решения дифференциального уравнения

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r}{\rho(T)} \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{r}{\rho(T)} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 0$$

при граничных условиях:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = 0 \text{ на поверхности шлаковой ванны};$$

$P = 0$ на границе с металлической ванной а также на границе с металлической заготовкой;

$$P = V_0 \text{ на графитовой футеровке 7};$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = 0 \text{ на внутренней поверхности секции 10},$$

которая шунтирует потенциал в этой зоне;

$$\frac{\partial P}{\partial r} = 0 \text{ на изоляторах кристаллизатора 5}.$$

Здесь $\rho(T,t)$ – удельное электрическое сопротивление шлака, зависящее от $T(r,z,t)$ – температуры в точке (r,z) в момент времени t . Величина $1/\rho(T,t)$ – проводимость шлака – зависит от химического состава шлака и меняется в зависимости от температуры. В расчетах использованы данные для флюса АНФ-6. Зависимость проводимости $1/\rho$ шлака от температуры следующая:

Температура, °C	1590	1640	1675	1712	1750
Проводимость, $1/\text{ом}\cdot\text{см}$	2,08	2,30	2,46	2,64	2,88

На рис. 3 представлены результаты расчета распределения потенциала $P(r,z)$ в шлаковой ванне при разности потенциалов 29 В между внутренней поверхностью графитовой футеровки 7 и поверхностями 1, 4 для случая наплавки слоя толщиной 85 мм на заготовку диаметром 180 мм. Уровень тока I определяли расчетным путем, и для данного случая он равен 7000 А.

Тепловыделение в шлаковой ванне для точки (r,z) в момент времени t определяется по следующей формуле:

$$W(r, z, t) = \frac{1}{\rho(T)} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial r} \right)^2 \right], U = Pk.$$

На рис. 4 приведено типичное распределение функции $W(r,z,t)$, соответствующее полю потенци-



ала, показанному на рис. 3, при температуре шлака 1600 °С в момент его заливки. Видно, что основное количество тепла концентрируется в зоне токоведущей секции кристаллизатора, обеспечивая формирование поверхности слитка.

Определение температурных полей. Температурное поле $T(r, z, t)$ для области заготовки, шлака и наплавленного слоя определяется в результате решения дифференциального уравнения

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{r}{\rho(T)} \left[\left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial r} \right)^2 \right] = r c \gamma \frac{\partial T}{\partial t}$$

при следующих условиях:

$$t = 0, T = T(r, z);$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \text{ для } r = 0;$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_1 (T - T_{cp})$$

для $z = 0, z = L_z$:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = [\alpha_{\text{возд}} + [(T_w + T_{cp})(T_w^2 + T_{cp}^2)] A] (T - T_{cp})$$

для $z = L_w$, т. е. для поверхности шлаковой ванны;

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L_w} = [\alpha_{\text{возд}} + [(T_c + T_{cp})(T_c^2 + T_{cp}^2)] A] (T - T_{cp})$$

для свободной поверхности слитка ниже кристаллизатора;

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L_k} = \frac{\alpha_b}{1 + \frac{\alpha_b \delta_{ct}}{\lambda_{ct}} + \frac{\alpha_b \delta_{tp}}{\lambda_{tp}}} (T - T_b)$$

для токоподводящей части кристаллизатора;

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L_R} = \frac{\alpha_b}{1 + \frac{\alpha_b \delta_{ct}}{\lambda_{ct}}} (T - T_b)$$

для формирующей части кристаллизатора.

В приведенных формулах используются следующие обозначения:

$\lambda(T)$ — коэффициент теплопроводности материала в точке (r, z) ;

$c\gamma(T)$ — объемная теплоемкость материала в точке (r, z) ;

α_1 — коэффициент теплообмена между затравкой и воздухом с температурой T_{cp} ;

α_b — коэффициент теплообмена между поверхностью слитка и водоохлаждающей секцией кристаллизатора с температурой T_b ;

$\alpha_{\text{возд}}$ — коэффициент теплообмена с окружающим воздухом с температурой T_{cp} ;

$T_{cp} = T_w + 273$ — температура поверхности шлака по Кельвину;

$T_c = T_c + 273$ — температура свободной поверхности слитка ниже кристаллизатора по Кельвину;

$T_{cp} = T_{cp} + 273$ — температура окружающей среды по Кельвину;

$A = \varepsilon \cdot 5,74 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}/\text{см}^2 \cdot \text{град}^4$, где $\varepsilon = 0,8$ — степень черноты поверхности;

λ_{ct} и β_{ct} — соответственно коэффициент теплопроводности и толщина стенки кристаллизатора;

λ_{tp} и δ_{tp} — соответственно коэффициент теплопроводности и толщина графитовой футеровки. В расчетах использованы данные для сплава типа Инконель.

Теплофизические свойства материала слитка в зависимости от температуры

$T, ^\circ\text{C}$	20	110	200	300	400	500	600	700	800	900
$\lambda, \text{Вт}/\text{см} \cdot ^\circ\text{C}$	0,11	0,12	0,14	0,15	0,17	0,19	0,20	0,22	0,24	0,25
$c\gamma, \text{Дж}/\text{см}^3 \cdot ^\circ\text{C}$	5,11	5,19	5,30	5,46	5,78	6,11	6,41	6,29	6,49	6,70

Кроме того, использованы следующие теплофизические данные: $T_L = 1425 ^\circ\text{C}$; $T_S = 1345 ^\circ\text{C}$; в интервале $T_L > T > T_S$, $c\gamma = 6,70 + q_{ck} / (T_L - T_S)$, где $q_{ck} = 1270 \text{ Дж}/\text{см}^3$ (q_{ck} — скрытая теплота плавления); при $T > T_L$ $\lambda = \lambda_{\text{зф}} = 0,83 \text{ Вт}/\text{см} \cdot ^\circ\text{C}$; для жидкого шлака $\lambda_w = 1,0 \text{ Вт}/\text{см} \cdot ^\circ\text{C}$, $c\gamma_w = 6,75 \text{ Дж}/\text{см}^3 \cdot ^\circ\text{C}$.

Типовые результаты численной реализации рассмотренной модели по разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона компьютерной программе приведены как для случая порционной наплавки на заготовку с использованием токоведущего кристаллизатора (рис. 5, а, б), так и для выплавки сплошного слитка (рис. 5, в) при скорости процесса 1 см/мин в обоих случаях.

Видно, что при выплавке сплошного слитка образуется типичная для процесса ЭШП металлическая ванна, для которой характерна значительная глубина и довольно большая двухфазная зона, т. е. зона для $T_L > T > T_S$. При наплавке слоя на метал-

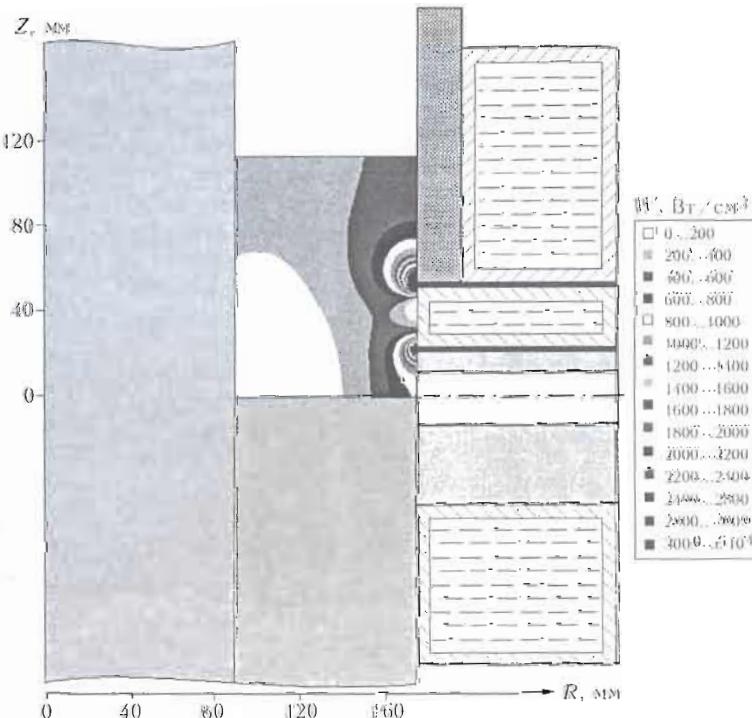


Рис. 4. Тепловыделение $W(r, z, t)$ в области шлаковой ванны

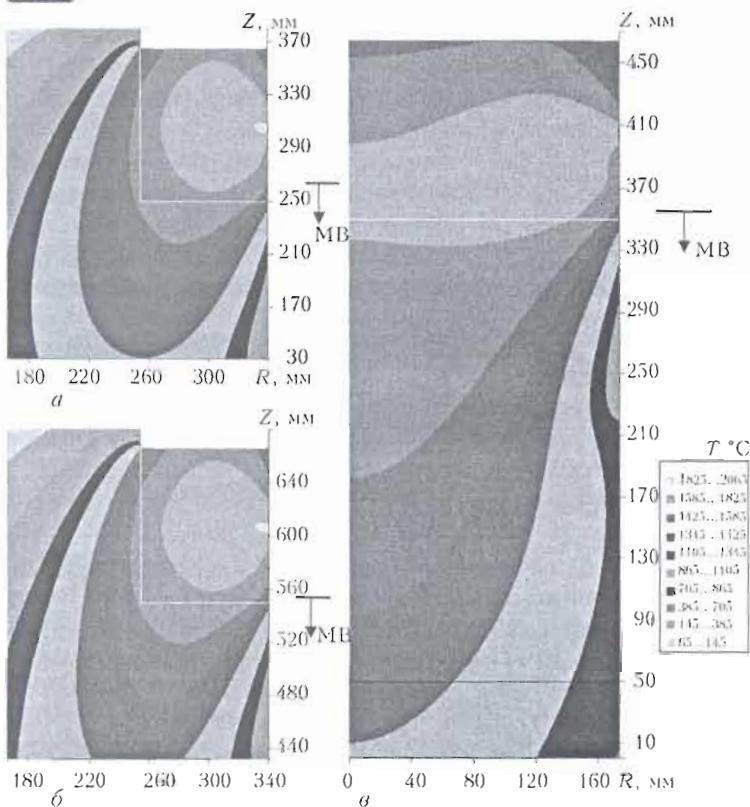


Рис. 5. Распределение температуры T в слитке через 1800 (а) и 3600 (б) с при наплавке второго слоя, а также через 2400 с при выплавке сплошного слитка диаметром 350 мм (в); стрелкой показан уровень металлической ванны (МВ)

лическую заготовку (рис. 5, а) даже в начале процесса при толщине около 80 мм размеры жидкокометаллической ванны значительно меньше, что создает возможность для управления размерами двухфазной зоны.

Модельные параметры двухфазной зоны. Прослеживание развития температурных полей, полученных в результате численных расчетов (рис. 5) позволяет получить следующие характерные параметры для каждой точки в двухфазной зоне [$T_L - T_S$]:

время пребывания металла для точки (r, z) в двухфазной зоне $\Delta t_{d,z}$ (рис. 6);

средний градиент температур $G = (G_L + G_S)/2$, где $G_L = \frac{\partial T}{\partial n} = \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2$ в момент, когда температура точки опустится до T_L , а G_S — когда температура достигнет T_S (рис. 7);

параметр A , согласно Баллантайну и Митчеллу [9–11] определяемый в виде

$$A = \frac{G^2 \Delta t_{d,z}}{T_L - T_S}, \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s/cm}^2,$$

малое значение которого характеризует равноосный тип кристаллизации, а боль-

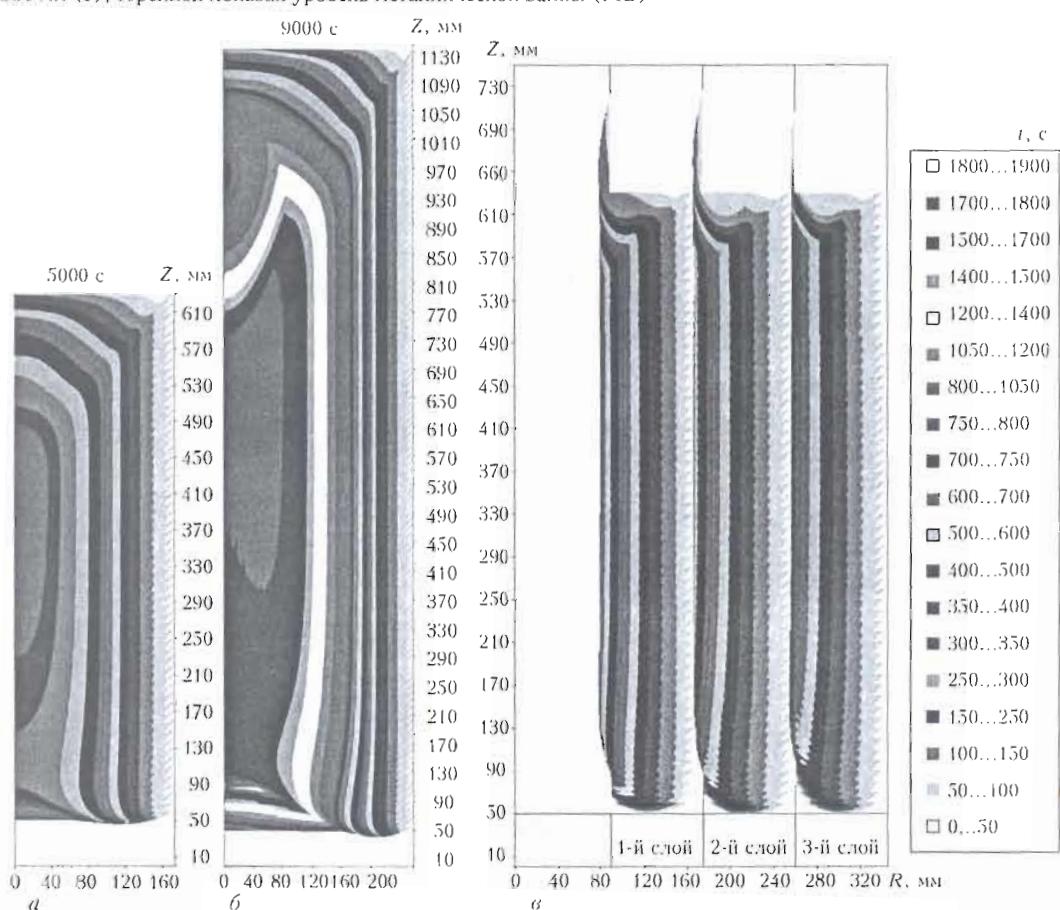


Рис. 6. Время t пребывания металла в интервале температур $[T_L - T_S]$ для сплошного слитка диаметром 350 (а), 520 мм для высоты 1200 мм (б) и после наплавки третьего слоя (показано распределение этого параметра и для двух предыдущих слоев) (в); скорость наплавки 1 см/мин

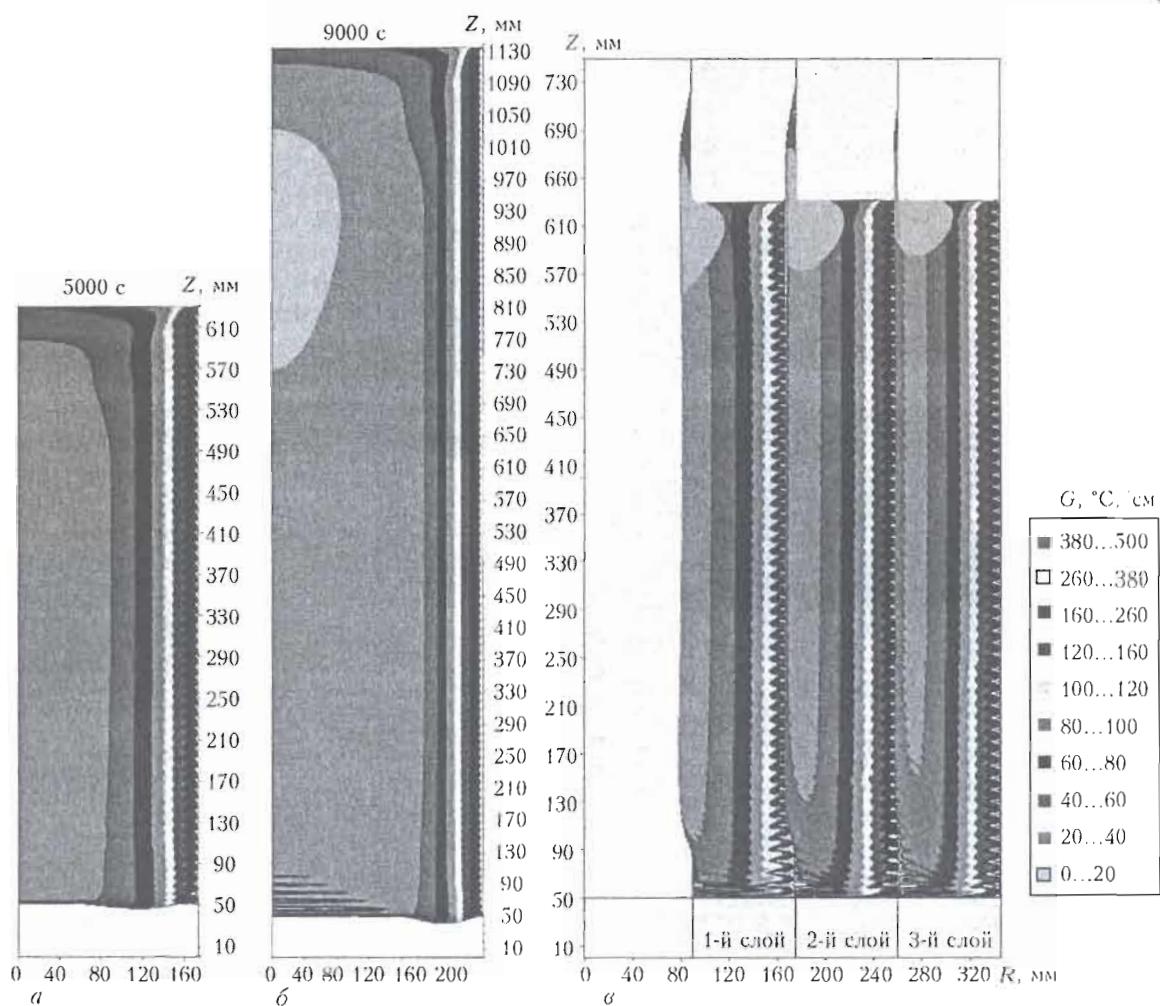


Рис. 7. Градиенты температур G в двухфазной зоне для слитка диаметром 350 (а), 520 мм для высоты 1200 мм (б) и после наплавки третьего слоя (показано распределение этого параметра и для двух предыдущих слоев) (в); скорость наплавки 1 см/мин

Сравнение энергетических и качественных (в двухфазной зоне) характеристик различных процессов

Параметры	Сплошной слиток на оси			Заготовка + первый слой Ø 350 мм		Заготовка + второй слой Ø 520 мм		Заготовка + третий слой Ø 690 мм	
	Ø 350 мм	Ø 520 мм	Ø 690 мм	на линии сплавления	+ 10 мм	на линии сплавления	+ 10 мм	на линии сплавления	+ 10 мм
Время пребывания $[T_L - T_S]$, с	790	1700	2200	710	490	590	430	440	340
Градиент температуры G , °C	19...20	11...12	9...10	38	33	50...52	32	56	38
Максимальный размер карбидов l_c , мкм	23...24	33...34	36...37	22	19	21	18	18	16
Расстояние между осями вторичных дендритов h_2 , мкм	130	162	174	127	114	120	110	112	103
Параметр A (Баллантайн)	4300	2500...2800	1800...2200	12000	6000	20000	5500	17000	6500
Мощность, кВт	245	510	790	200		400		600	
Производительность процесса, кг/ч	459	1013	1784	338		554		771	
Производительность на 1 кДж эффективной энергии, г/кДж*	0,53	0,55	0,63	0,47		0,38		0,35	

*Без учета затрат на получение жидкого металла и cosφ при скорости наплавки 1 см/мин и $\Delta x = \Delta z = 1$ мм.

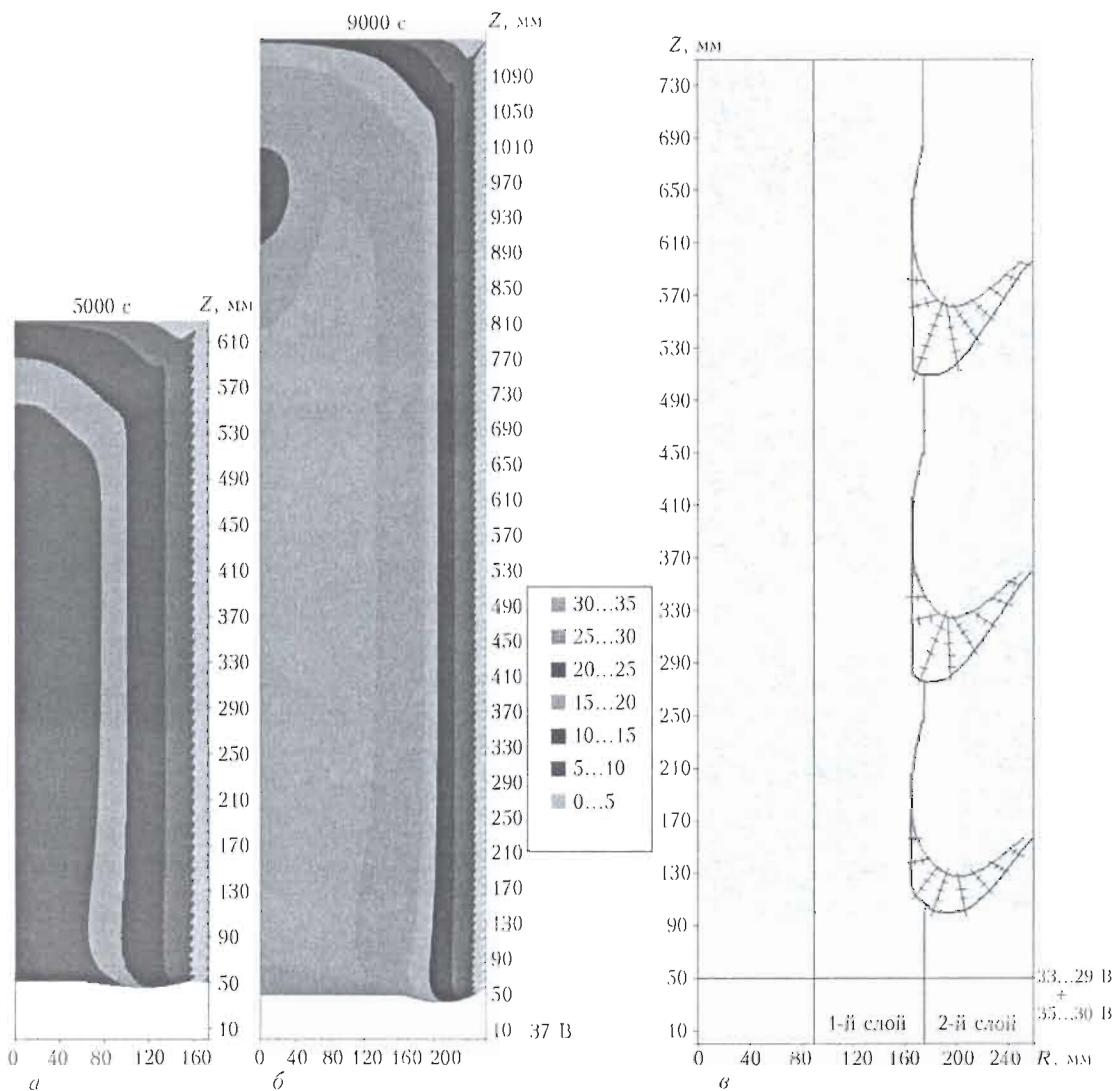


Рис. 8. Максимальные размеры карбидов в двухфазной зоне для слитка диаметром 350 (а), 520 мм для высоты 1200 мм (б); схема расположения первичных и вторичных дендритов при кристаллизации второго слоя (в); скорость наплавки 1 см/мин

шое указывает на наличие дендритной столбчатой структуры;

расстояние между осями вторичных дендритов; максимальные размеры карбидов (NbC), образовавшихся при кристаллизации металлической ванны — l_c (рис. 8 а, б).

При этом расстояния между осями вторичных дендритов, согласно Баллантайну и Митчеллу [6], определяются формулой

$$h_2 = 20,2 \Delta t_{д.з}^{0,28} [\text{мкм}], 2l_c \approx 0,3h_2 - 15 [\text{мкм}].$$

Схема расположения первичных и вторичных дендритов показана на рис. 8, в.

Результаты расчета параметров двухфазной зоны. Примеры расчета указанных параметров для случая выплавки сплошных слитков диаметром 350..690 мм, а также для слитков, полученных с помощью укрупнения способом многослойной ЭШН ЖМ в токоподводящем кристаллизаторе, приведены на рис. 6–8, а также в таблице.

Из этих данных видно, что параметры состояния металла в двухфазной зоне для канонического слитка ЭШП ухудшаются с ростом его диаметра: увеличивается время пребывания $\Delta t_{д.з}$, снижается градиент температур G , возрастают размеры карбидов l_c и расстояние между осями вторичных дендритов h_2 , а также уменьшается параметр A .

Сопоставление с этими данными аналогичных значений для слитков, полученных способом многослойной ЭШН ЖМ в токоподводящем кристаллизаторе, показывает, что основные характеристики металла в двухфазной зоне для самой неблагоприятной стадии наплавки первого слоя являются более предпочтительными, даже по сравнению с выплавкой канонического слитка ЭШП диаметром 350 мм, качества которого считается отвечающим техническим требованиям по получению осадкой заготовок соответствующего диаметра. Естественно, что из слитка диаметром 690 мм, изготовленного по рассматриваемой технологии укрупнения способом многослойной ЭШН ЖМ в токоподводящем кристаллизаторе, можно получить осадкой кованую за-



готовку, по крайней мере, в 2 раза большую по диаметру при хорошем качестве металла.

Итак, разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона новый электрошлаковый процесс укрупнения тяжелых слитков, который базируется на одно- или многократной кольцевой ЭШП на центральный слиток способом ЭШП ЖМ в токоподводящем кристаллизаторе металла аналогичного химического состава, позволяет получать заготовки большого диаметра, микроструктура первичной кристаллизации которых соответствует требованиям, обеспечиваемым только в слитках ЭШП малого диаметра. Таким образом, открываются принципиально новые возможности при решении проблемы производства крупных кузнецких слитков ЭШП для поковок роторов и дисков мощных современных паровых и газовых турбин из высоколегированных сталей и сплавов, а также другой крупнотоннажной машиностроительной продукции.

1. Large 718 forgings for land based turbines / R. C. Schwant, S. V. Thamboo, A. F. Anderson et al. / Superalloys 718, 625, 706 and various derivatives: Proc. intern. symp. Superalloys 718, 625, 706 and various derivatives // TMS. — 1997. — № 7. — Р. 141–152.
2. Митчелл А. Об изготовлении крупных поковок из сплавов, чувствительных к сегрегации // Современ. электрометаллургия. — 2005. — №2. — С. 3–8.
3. Патон Б. Е., Медовар Л. Б., Саенко В. Я. / О некоторых «старых-новых» задачах ЭШП // Там же. — 2004. — № 3. — С. 7–10.

4. Новый технологический процесс получения сверхкрупных стальных слитков способом ЭШП ЖМ / Б. Е. Патон, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Там же. — 2007. — № 1. — С. 3–7.
5. Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве / Б. И. Медовар, В. Л. Шевцов, Г. С. Маринский и др. — Киев: Наук. думка, 1978. — 303 с.
6. Математические модели для систем автоматического управления процессом ЭШП полых слитков и круногабаритных кузнецких слитков / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, Л. В. Чекотило и др. // Математические методы в исследовании процессов специальной электрометаллургии. — Киев: Наук. думка, 1976. — С. 99–112.
7. Некоторые результаты числовых исследований и экспериментальной проверки математической модели выплавки полых слитков ЭШП / Б. И. Медовар, В. И. Махненко, В. М. Баглай и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1977. — Вып. 7. — С. 10–13.
8. Исследование параметров электрошлаковой плавки в токоподводящем кристаллизаторе / Ю. М. Кусков, В. И. Ус, С. В. Томиленко и др. // Там же. — 1995. — № 3. — С. 24–28.
9. Баллантайн А. С., Митчелл А., Вадье Дж. Ф. Прогнозирование структуры слитков сплава Инконель 718 ЭШП и ВДП // Электрошлаковый переплав. — Киев: Наук. думка, 1983. — Вып. 6. — С. 198–202.
10. The Macroscale Simulation of Remelting Processes / L. A. Bertram, P. R. Schusk, S. N. Kempka et al. // JOM. — 1998. March. — P. 16–21.
11. The Stochastic Modelling of Solidification Structures in Alloy 718 Remelt Ingots // L. Nastac, S. Sundarra, O. Ku et al. // Ibid. — P. 30–35.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 09.09.2008

УДК 669.117.56

ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

А. Митчелл

Приведен обзор исследований в области применения электрошлакового переплава (ЭШП) для материалов аэрокосмической промышленности, показаны результаты этих исследований.

Review is made of investigations in the field of ESR application for materials of aerospace industry, the results of these investigations are shown.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав; сплавы; детали двигателей; качество

Введение. Впервые ЭШП в производстве аэрокосмических сплавов применили как процесс Гопкинса с целью повышения качества изделий. Технологии открытой индукционной (ОИП) или электродуговой (ЭДП) плавок были непригодны для получения высоколегированных сталей или сплавов на основе никеля с необходимым уровнем чистоты металла и низким содержанием серы, требуемых для изготовления деталей двигателей. Этот процесс, в котором использовали плавку на постоянном токе на возду-

хе, обеспечивал более высокое качество металла, чем ОИП, ЭДП, однако вскоре был вытеснен из-за преимущества вакуумной технологии как при вакуумно-индукционной плавке (ВИП), так и при вакуумно-дуговом переплаве (ВДП), а также других способах вторичной обработки электросталей (вакуумирование, ковшевая металлургия, позднее АOD). В это же время, главным образом благодаря работам Б. И. Медовара по применению технологии ЭШП на переменном токе, в бывшем СССР получены существенные результаты при производстве стальных изделий ЭШП высокого качества. Несмотря на очевидный прогресс в создании технологий вакуумной

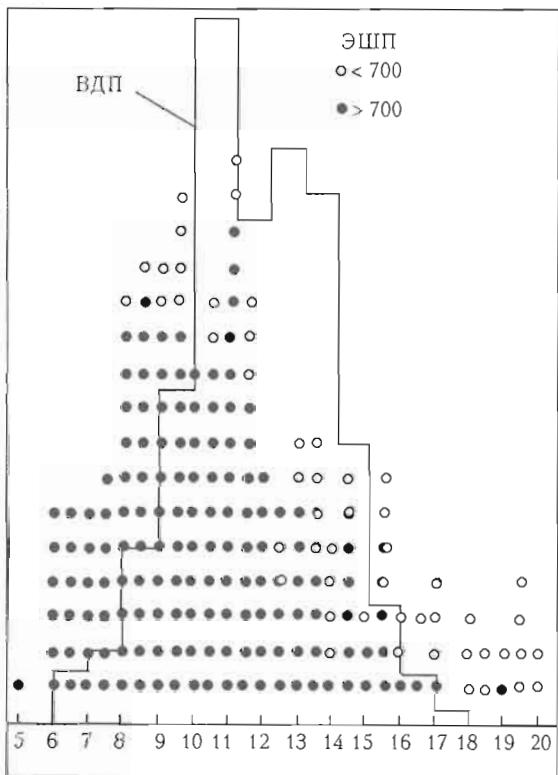


Рис. 1. Общее количество включений (оценка по АСТМ 45Е) в стали 35 NDC16 для шасси

плавки это стало побудительным мотивом для исследований западных промышленников в области аэрокосмических сплавов.

Ранние разработки в Европе и США способствовали производству небольших партий слитков из сплавов на основе никеля (Нимоники, Хастеллои, Инконели), в которых содержание включений и структура сегрегации были крайне привлекательны, по сравнению с эквивалентными слитками, выплавленными способом ВДП [1].

Дальнейший прогресс требовал создания и внедрения крупных печей ЭШП, что частично было выполнено в результате приобретения советского оборудования и технологии, а также разработки конструкций печей различными компаниями, занимающимися выплавкой специальных сплавов или продажей оборудования ВДП. Производство высококачественных сталей общего назначения наладили очень быстро, но вскоре признали, что требования к аэрокосмическим сплавам — это не просто оценка металлургического качества слитков, полученных в лабораторных условиях. Практическое применение аэрокосмических сплавов сопровождается сложной сетью оценок, контроля качества (Q/C) и гарантий качества (Q/A) [2]. Для того, чтобы использовать сплав, полученный с помощью нового процесса, даже если он является хорошо известным материалом, производитель обязан следовать определенным правилам [3]: сплав должен выплавляться из качественного источника сырья и способом, точно соответствующим установленной практике, последовательно изготовить большое количество слитков (обычно не менее пяти), соответствующих существ-

ующим техническим условиям, а также иметь комплект систем QA/QC и идентификационных систем, приемлемых для пользователя и правительственноного авиационного органа [3, 4].

Все указанные системы и материалы должны пройти технический аудит изготовителями поковок и пользователем, а иногда и FAA (US Federal Aviation Act). Очевидно, что для такой системы требуется не только простая проверка механических свойств.

По этой причине внедрение ЭШП для аэрокосмических материалов, уже отвечающим техническим требованиям ВДП, было сложной проблемой, поскольку требовалась оценка не только свойств, но и программы разработки конструкций печей, систем управления и операционных систем. Этот порядок сохранился и до настоящего времени, так как изучение точной роли ЭШП в изготовлении этих ответственных деталей продолжается.

Сложность ЭШП можно проиллюстрировать на примере внедрения способа в процесс изготовления поковок шасси из сплавов 300M и 35NCD16 [5]. Значения K_{1c} для сплава ЭШП, влияющие на его динамическое поведение, оказались выше, чем у сплава ВДП [6, 7]. Эффект обусловлен главным образом разным содержанием включений при этих двух процессах (рис. 1).

Однако экономическое преимущество, заключающееся в улучшении свойств, было недостаточным для возмещения расходов по переквалификации изделия из ВДП в ЭШП. Поэтому стальные поковки продолжают изготавливать из сплава ВДП, несмотря на его худшие свойства. Грядущие изменения в технических условиях вызывают сомнения при использовании титановых сплавов в конкретных деталях. Однако технические условия для сталей неаэрокосмического назначения смогут быть легко изменены в случае применения нового процесса. На разницу в содержании включений ЭШП и ВДП применительно к суперсплавам указывали несколько авторов [8–13].

Наиболее эффективным предполагается применение ЭШП в производстве вращающихся деталей, используемых в турбинах крупных промышленных двигателей. Для этого требуется не только крайне высокая степень работоспособности и надежности изделия, но и наличие заготовок большого диаметра. Кроме того, уменьшению стоимости изделий может способствовать последовательность процесса внедрения.

Структура слитка и последствия нестабильности процесса. Тепловой баланс печи ЭШП такой же, как и в случае ВДП, но с некоторыми важными различиями. Термовложение на верхнюю поверхность слитка ЭШП состоит из тепла, передаваемого от нагреветого шлака, а также энталпий потока жидкого металла. В верхней поверхности слитка ВДП тепловложение состоит из теплового эффекта быстро перемещающейся дуги и энталпий потока жидкого металла [14]. В результате, значения темпера-

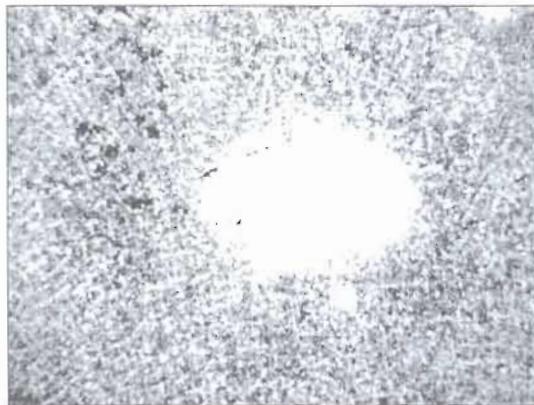


Рис. 2. «Белое пятно» в заготовке IN718 (ВДП), ×100

туры верхней поверхности одинаковы в двух процессах, но поверхность при ЭШП имеет более устойчивый поток тепла во времени вследствие благоприятного влияния теплоемкости шлака.

Эта разница в процессах означает, что ЭШП имеет меньшую тенденцию к образованию дефектов макроструктуры слитка, возникающих в процессе нестабильности, таких как «белые пятна» [15] (рис. 2) и дендритные кольца или полосы [16] (рис. 3). Оба эти дефекта указаны в технических условиях, что налагает серьезные ограничения на их присутствие в сплавах для ответственных изделий. Как правило, технические условия допускают наличие небольших областей «белых пятен», не связанных с грядьями неметаллических включений (чистые «белые пятна»), но отбраковывают сплавы с большими «белыми пятнами» (например, более 2...3 мм в сечении заготовки диаметром 200 мм, предназначенный для поковок диска) и особенно, если они грязные. Хотя не зафиксировано ни одного случая разрушения работающей турбины, вызванного усталостной трещиной от «белого пятна».

Существуют проблемы с надежностью этих высоконапряженных деталей из-за дефектов в материале заготовки, обнаруженных с помощью неразрушающего контроля, а также с невозможностью характеризовать дефект с двухмерной протравленной поверхностью. Поэтому необходимы повторные испытания и изучение протравленной поверхности дополнительных сечений, даже если «белое пятно» небольшое и чистое.

«Белые пятна» обнаруживаются в изделиях из спиральных сплавов ЭШП только в отдельных случаях. Механизмы, отвечающие за их формирование при ВДП, не могут срабатывать при ЭШП, за исключением случаев образования кристаллизационных «белых пятен» одного типа, а также обрушения конца оплавленного электрода.

Показано, что этот последний механизм существует при ЭШП в условиях очень плохого качества электрода из-за пористости в его центральной части в сочетании с низкой нестабильной скоростью плавления. Однако даже в этом случае получающиеся в результате «белые пятна» не только небольшие, но также свободны от неметаллических включений

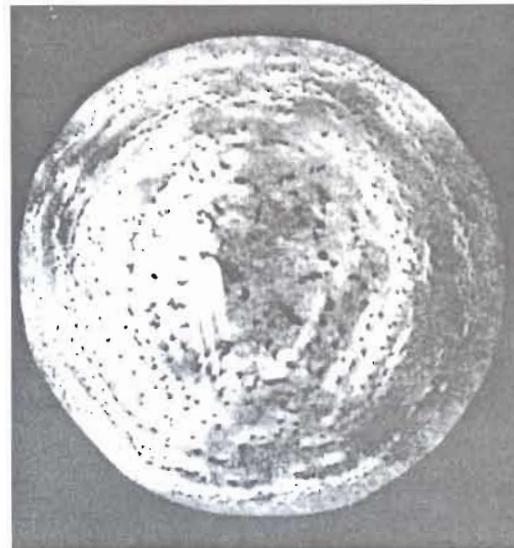


Рис. 3. Центральная сегрегация в заготовке диаметром 152 мм из суперсплава (ESR)

благодаря растворению включений в виде оксидов в жидком шлаке.

Кристаллизационные «белые пятна» в слитках ЭШП, обычно небольшие и чистые, не вызывают трудностей в производстве. Отсутствие «белых пятен» в изделии хорошо контролируемого процесса ЭШП станет преимуществом в случае использования ЭШП для изготовления вращающихся деталей, хотя и большие экономическим, чем техническим.

Проблема «белого пятна» обнаруживается на стадии производства заготовки с помощью отражений от связанных с ним включений и/или трещин, а также с помощью исследований протравленных поверхностей. Маловероятно, что «белое пятно» того размера и типа, которое может вызвать разрушение при эксплуатации сплава ВДП или ЭШП, не будет учтено при контроле качества.

Однако поскольку в ходе исследования с протравкой дефект обнаруживается только на одной поверхности, любые даже незначительные дефекты следует подвергать дальнейшим исследованиям, что связано с большими экономическими затратами в производственном цикле. Последнее не принимают во внимание во всех отраслях промышленности, кроме аэрокосмической, но оно является крайне важным отличием изделий ЭШП от ВДП. Изделие, не прошедшее испытание на качество в начальной стадии, но требующее частых повторных испытаний и оценок, является экономическим бременем для производителя, даже если заготовка удовлетворяет всем требованиям технических условий. Этот фактор может нарушить баланс между ВДП и ЭШП, исключая все преимущества, и сосредоточить внимание только на прямых эксплуатационных расходах.

Полосчатость и дендритные кольца, в какой-то степени, обнаруживаются практически во всех процессах переплава. Дендритные кольца являются важными с точки зрения металлургии, если можно доказать, что они способны влиять на свойства. В случае с высокопрочными сталью очень ярко вы-



раженные кольца способствуют снижению усталости долговечности на 10 %, но в общем в этих сплавах процессы гомогенизации, используемые при ковке и термообработке, позволяют устранить незначительные различия в химических составах или, по крайней мере, уменьшают их проявление до той степени, когда они не оказывают явного влияния на свойства.

Такое улучшение происходит, поскольку основными элементами, делающими кольца видимыми при травлении, являются углерод и фосфор; они легко диффундируют при температурах термообработки. У сплавов, для которых изменение состава имеет более значительное влияние, например, на температуру фазового превращения, фазовые равновесия или реакции осаждения, от образования колец будет зависеть качество. Для суперсплавов такими реакциями могут быть осаждение первичных карбидов или образование эвтектической фазы Лавеса. У титановых сплавов это влияние может привести к изменениям локальной температуры фазового превращения и, в конечном итоге, — к изменению локального соотношения фаз в конечном продукте.

В технических требованиях аэрокосмической промышленности, как правило, эта проблема рассматривается на основе качественного фотографического сравнения для определения степени полосчатости относительно стандартных металлографов, но эта система включает как эффект дендритных колец, так и результат сильной междендритной ликвации, проявляющейся в виде полос в кованой и катаной структуре. Очень важно различать эти два эффекта, поскольку их причины, скорее всего, различны еще на стадии изготовления слитка.

Дендритные кольца образуются в результате неравномерного движения фронта кристаллизации в слитке, что может быть вызвано рядом причин внутри печи, наиболее значительные из которых возникают, когда в процессе ЭШП происходит движение кристаллизатора и слитка относительно друг друга или при смене электрода.

В аэрокосмической промышленности нет спецификации на ЭШП, позволяющей использовать этот тип процесса для конечного продукта. В обычном процессе ЭШП, как правило, отсутствуют резкие изменения тепловых потоков, вызывающих указанный эффект из-за теплоемкости шлака. Однако если процесс выполняется при нестабильных движениях электрода или погружении его в шлак, энергетические изменения, провоцируемые при этом, могут привести к появлению дендритных колец. Тем не менее, изменения можно легко определить по записи процесса, и часть слитка, имеющаяся такие характеристики, может быть отбракована на ранней стадии обработки до того, как затраты на процесс поднимутся до высокого уровня. Еще одной потенциальной причиной образования дендритных колец в слитках ЭШП является резкое изменение пути тока в ходе процесса, что может привести к образованию отдельных, четко выраженных, колец в

литке. Данный вопрос является важным, поскольку это явление нельзя четко проследить исходя из записей параметров процесса.

Полосчатость образуется в результате расширения междендритной сегрегации в ходе односторонней механической обработки (прокатки или проковки), и она редко бывает симметричной в радиальном направлении. Согласно стандартам аэрокосмической промышленности, в случае серьезных дефектов требуется отбраковка, поскольку в суперсплавах эта полоса будет содержать первичные карбиды с недопустимыми размерами (например, NbC в IN718, TiC в Уаспаллое) и вредные фазы (δ -фаза в IN718 в соотношении, вызывающем колебания размера зерна) и, возможно, эвтектические фазы Лавеса.

Гранулометрический состав карбида в суперсплавах нельзя изменить значительно при помощи гомогенизирующей обработки, поскольку температура, необходимая для растворения карбида, слишком близка к температуре солидуса сплава для реальных условий обработки.

Долю δ -фазы нельзя изменить без значительной высокотемпературной гомогенизации для снижения высоких локальных концентрационных градиентов ниобия. Невозможно удалить эвтектические фазы Лавеса без риска образования локальной ликвации по границам зерен при требуемой температуре. Поэтому полосчатость необходимо устранять еще на стадии затвердевания слитка при помощи соответствующего регулирования таких параметров кристаллизации, как температурный градиент и скорость кристаллизации, чтобы междендритная ликвация находилась на приемлемом уровне.

Таким образом, определяем границы использования процесса ЭШП данных сплавов, поскольку сюда также входят фундаментальные металлургические переменные «нормальной» структуры. Предел достигается, если полосчатость заготовки, появившаяся в результате ликвации в центре, превышает допустимые границы.

Процесс ЭШП обещает быть более стабильным чем ВДП и, следовательно, позволит изготавливать слитки, менее склонные к образованию дефектов вследствие нестабильности. Это предположение было темой различных опытных проектов, выполняемых с целью квалификации ЭШП как процесса, которому следует отдавать предпочтение при изготовлении авиационных двигателей. Однако основным аргументом при сравнении является сочетание его потенциальных преимуществ с требованием получения «нормальной» металлургической структуры слитка, в соответствии со спецификациями аэрокосмической промышленности.

«Нормальная» структура слитка. У процесса ЭШП сложный тепловой баланс. Коэффициент теплопереноса по оси слитка зависит от толщины шлаковой корки и задается температурой шлака, которая в свою очередь определяется сочетанием гео-

метрии слитка, химического состава шлака, а также скоростью плавления.

Для удовлетворения требований микро- и макросегрегации и получения структуры, соответствующей требованиям стандартов на вращающиеся детали из суперсплавов, необходимо уменьшить максимальный диаметр слитка приблизительно до 450...500 мм. Если этот диаметр превышен, то получим область режима теплонаправления, в которой любая скорость плавления не обеспечит достаточно малое время локального затвердевания для образования необходимой мелкозернистой структуры [17–19].

Данное ограничение означает, что «устойчивый» процесс, т. е. процесс с достаточно широким диапазоном эксплуатационных параметров, можно осуществить только для слитков диаметром менее 450 мм в случае более чувствительных сплавов (например IN718), 500 мм — для менее чувствительных (например, Уаспаллоу с низким содержанием титана) и очень маленького диаметра — для склонных к сегрегации сплавов с высоким содержанием γ -фазы (например Рене 95).

Поскольку на практике для большинства кованых деталей требуются заготовки диаметром 200 мм, могут возникать проблемы в процессе дальнейшего передела слитков с целью обеспечения требуемой рекристаллизации и получения мелкозернистой структуры.

Если процесс осуществляют на слитке предельного диаметра в условиях, где даже небольшие отклонения от идеальных параметров могут привести к нарушению жестких границ оптимального процесса, появляется риск образования структурных аномалий в материале, в основном сегрегация.

При достаточно жестких требованиях к качеству в аэрокосмической промышленности это создает несколько критических проблем, прежде всего с обнаружением дефектов при неразрушающем контроле. Если сегрегация является достаточно сильной и может вызвать образование областей хрупкости в микроструктуре (путем выделения, например, фазы Лавеса или больших карбидов), которые в результате последующей горячей деформации формируют довольно большие трещины, обнаруживаемые при помощи ультразвука, то нужно установить критерий отбраковки этой части заготовки.

Для отбраковки всего слитка требуется показание ультразвукового контроля и наличие трех дефектов размерами более 800 мкм в заготовке. Важной является и оценка макроструктуры, выполненная при помощи протравленного шлифа поперечно-го сечения в соответствующей точке. Если параметры процесса хотя бы незначительно изменялись, что способствовало периодической сегрегации по длине слитка, то результаты контроля по выборочным поперечным сечениям заготовки могут быть недостаточно надежными. Это является характерной особенностью всех процессов переплава, поэтому в аэрокосмических методиках квалификации следует делать акцент на записи процессов и их оценке, а

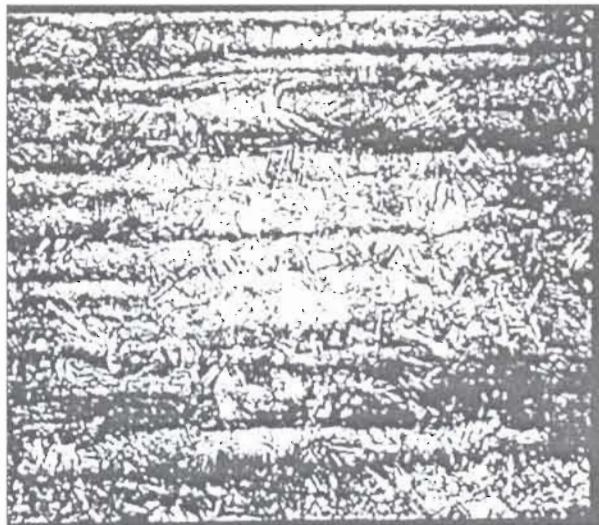


Рис. 4. Полосчатость в заготовке ЭШП из мартенситно-стареющей стали прочностью 300 ksi, $\times 100$

также на системы контроля процесса. Для промышленности главное правило состоит в том, что «качество нужно обеспечивать при помощи управления процессом, а не контроля изделия».

При разработке программ обнаружили, что если процесс ЭШП использовать для изготовления слитка заданного сплава предельного или почти предельного диаметра, то он будет склонен к небольшим отклонениям в условиях затвердевания, при которых в слитке появляются участки с недопустимой сегрегацией. Такое беспорядочное появление так называемой центральной сегрегации [20, 21] (рис. 4) является основной причиной, по которой изделия ЭШП не используются широко в аэрокосмической промышленности.

При ЭШП также создаются определенные проблемы в случае обнаружения небольших отклонений в процессе. Подобно ВДП, процесс ЭШП является электрически «шумным» и поэтому трудно точно измерить небольшие отклонения в скорости плавления, расположении электрода, если не использовать сложные программы усреднения сигналов датчиков с шумами.

Небольшое отклонение в виде маленького кусочка электрода, падающего непосредственно в ванну слитка, регистрируется в этих системах только как изменение в средней скорости плавления и, следовательно, его трудно определить. Можно было бы выполнить более точный оперативный анализ компонентов усредненных расчетов, но этот вариант еще не реализован. Еще более сложным является контроль путей тока.

Электрический ток разделяется между шлаком и кристаллизатором, и это является основной составляющей факторов, определяющих профили температуры, и следовательно, затвердевания в слитке. Если распределение тока изменяется, в слитке изменяется профиль локального затвердевания. Возможность измерить это распределение в оперативном режиме еще не установлена. Контроль распределения, видимо, представляет собой очень точное



сбалансированное сочетание условий пуска и контроля стационарного погружения электрода в шлак в установившемся режиме. Опыт показывает, что большие проблемы с центральной сегрегацией и, в итоге, с пятнистостью могут возникать из-за недостаточного контроля этого отклонения, что является постоянным препятствием для использования процесса ЭШП для изготовления ответственных деталей.

«Трехступенчатый» процесс плавления. Процесс ЭШП позволяет изготавливать сплавы более чистые, в отличие от получаемых при помощи других способов. Дело в том, что ЭШП используется в последовательности, называемой «трехступенчатым плавлением» [22, 23]. Указанный комбинированный процесс является попыткой объединить наилучшие характеристики ЭШП и ВДП для того, чтобы улучшить качество продукции.

Эта последовательность заключается в вакуумном индукционном плавлении, за которым следует ЭШП, а затем ВДП (ВИП + ЭШП + ВДП). Такая комбинация может показаться дорогостоящей, однако присутствуют некоторые аспекты, способствующие снижению себестоимости. Во-первых, поскольку при ЭШП допускается более низкое качество электрода, чем при ВДП, условия отливки и отжига электрода здесь не настолько строги, как для ВДП. Хотя электрод должен быть прочным и свободным от внутренних напряжений для предотвращения растрескивания и фрагментации при плавлении, допускаются незначительная центральная пористость и существенная микросегрегация. Во-вторых, поскольку в процессе ЭШП хорошо удаляются тугоплавкие и шлаковые включения, можно свести до минимума использование сложных фильтров и разливочных устройств в ВИП, а также выполнять некоторую десульфурацию при помощи шлака. Кроме того, процесс ЭШП можно осуществлять при большей скорости плавления, чем ЭШП слитка без сегрегации.

Затем следует процесс ВДП с использованием слитка ЭШП со снятыми напряжениями в качестве электрода, что значительно улучшает управление процессом благодаря применению стандартной методики мелкокапельного переноса металла.

Отсутствие раковин в электроде, больших макросегрегаций или шлаковых включений обеспечивает лучшую воспроизводимость поведения дуги и, таким образом, более точный контроль зазора между электродом и слитком, что способствует получению контролированной микро- и макроструктуры слитка.

Несколько увеличивается стоимость в результате применения дополнительной обработки поверхности ЭШП слитка перед ВДП, а также при необходимости точно контролировать химический состав на стадии ЭШП. Вся последовательность процесса является менее затратной, чем альтернативных схем (порошковой металлургии), не требуется длительных процедур согласования при аттестации деформируемых сплавов.

Процесс «трехступенчатого» переплава позволяет значительно улучшить качество ответственных деталей. Однако следует отметить, что это улучшение касается не фундаментальных статических свойств сплава (прочности или пластичности), а динамических, связанных с усталостной долговечностью и скоростями роста трещины. Диски турбины, изготовленные по схеме ВИП + ВДП, применяемые в гражданской авиации, сейчас, как правило, заменяют из-за малоцикловой усталости после приблизительно 4000 циклов. Этот срок составляет менее 25 % теоретического срока службы детали из суперсплава, определенного при помощи расчетов, включающих отдельную характеристику вероятного распределения дефектов в процессе производства.

Вследствие снижения содержания включений и более контролированной микроструктуры металла в изделии после тройного переплава можно уменьшить ограничения по сроку службы и увеличить эксплуатационную долговечность детали. Если получаемое сокращение текущего ремонта и простой промышленных авиационных двигателей сопоставить с предельным увеличением стоимости процесса тройного переплава, то, очевидно, результат является экономически жизнеспособным. Большинство моторостроителей во всем мире приняли эту схему в качестве стандартной, и объем промышленного использования ЭШП за последние годы значительно увеличился.

Необходимо отметить, что сочетание упомянутых факторов свидетельствует о том, что сплавы ЭШП можно использовать непосредственно для производства вращающихся деталей в авиадвигателях, если только выплавляемый слиток ЭШП по размеру намного меньше пределов, налагаемых критерием нормального плавления. В этих условиях при надлежащем контроле он будет соответствовать определению надежного процесса. Следовательно, слиток потенциально и фактически пригоден для изготовления небольших двигателей и в данный момент ЭШП суперсплавов используют в ограниченном масштабе.

Слиток можно использовать при изготовлении статических деталей (например, корпуса или камеры сгорания), если они не являются такими ответственными, как вращающиеся, а форма деталей такая, что структуры дефектов, описанных выше, не являются проблемой. Однако большие гражданские двигатели имеют намного больший рынок, и именно в этой области ЭШП находит наиболее удачное применение в схеме «трехступенчатого» переплава.

Применение ЭШП для титановых сплавов. Вращающиеся детали, изготовленные из титана, являются наиболее ответственными изделиями для гражданской авиации, несмотря на проблемы с обнаружением дефектов в этих сплавах, а также существенные metallургические недостатки из-за высоких скоростей роста в них трещин. К тому же, диск вентилятора является наиболее тяжелой вра-



щающейся частью двигателя и, следовательно, представляет наибольший потенциальный риск появления опасного повреждения. К сожалению, такие повреждения были зафиксированы в некоторых случаях в гражданской авиации. Это привело к значительному снижению срока службы двигателей.

Основной металлургической проблемой являются так называемые тяжелые α -частицы [24], представляющие собой обогащенную азотом область α -фазы, размеры и свойства которой создают предпосылки для начала образования трещины в детали. Наиболее опасные варианты дефектов зарождаются в титановой губке, используемой в производстве сплава, хотя установлены 25 других источников в схеме стандартного трехкратного процесса ВДП [25]. Для обеспечения удаления дефекта из сплава технологический процесс изменен с трехкратного ВДП на электронно-лучевую плавку с холодным подом (ЭЛПХП) + ВДП большинством производителей двигателей и успешно. Последний этап ВДП сохранен для контроля макроструктуры слитка.

Однако схема с ЭЛПХП является достаточно дорогостоящим процессом. Высказано предположение [26–28], что ЭШП мог бы обеспечить упомянутое преимущество благодаря потенциальной возможности растворения титановых частиц, богатых азотом, в соответствующем шлаке. В этом случае в ЭШП можно было бы заменить современную схему плавления губки на первом этапе изготовления слитка с последующим ВДП, а также сделать заключительным процессом изготовления слитка для титановых сплавов, не предназначенных для авиационно-космической промышленности.

Химический аспект процесса остается непонятным, поскольку CaF_2 (используемый для расплавления титана) не растворяет TiN , а процесс его удаления основывается на разложении TiN при помощи добавок в шлак металлического кальция с использованием его способности растворяться в CaF_2 при высоких температурах. Плотность тока электрода, необходимая для поддержания жидкой пленки на титановом электроде, выше, чем базовая плотность обменного тока на поверхности раздела $\text{Ti}-\text{CaF}_2$. Требуемая мощность для ЭШП достаточно высока для поддержания мягкой дуги на поверхности электрода, что делает эту схему более близкой к дуговошлаковому процессу, чем к стандартному ЭШП относительно характеристик теплопереноса. Предложено использовать неплавящиеся электроды во избежание стадии уплотнения губки, что еще больше усложняет анализ процесса. Пока неясно, можно ли использовать эту версию ЭШП с титановыми сплавами, предназначенными для вращающихся деталей.

Выводы

- Установлено, что даже при интенсивных конструкторских работах ЭШП нельзя экономично ис-

пользовать для суперсплавов, применяемых в элементах больших вращающихся деталей.

- Для создания удовлетворительной микро- и макроструктуры готовой детали требуется слиток такого диаметра, который нельзя трансформировать в необходимый диаметр заготовки.

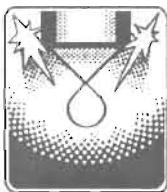
- Установлено, что процесс лучше всего использовать как способ подготовки электрода для ВДП, поскольку объединяются наилучшие характеристики обоих процессов. В этом режиме ЭШП делает значительный вклад в улучшение рабочих характеристик широкого диапазона авиационных двигателей.

- Использование ЭШП при изготовлении титановых сплавов для аэрокосмической промышленности все еще находится на стадии ранних разработок и его потенциал еще предстоит изучить.

- Kelly T. N., Klein H., Sun R., Venable W. // Proc. 5th Intern. symp. on electroslag technologies. — Pittsburgh, USA, 1974. — Part 1. — P. 150–180.*
- For example, PWA Specification 370, Pratt & Whitney Aircraft Engines Corp.*
- US Federal Aviation Act, 1958.*
- Koenig R. J. // Proc. conf. on electron beam melting. — NJ USA, 1991. — P. 27–31.*
- Rayne D., Gavarr A., Rambaud J. B. // Materiaux et Techniques. — 1981. — P. 359–366.*
- Harris D., Priest A. H. // Technical Report PROD/EM/1/79. — 1979.*
- Skylstad K. J. // Report A-5530-KJS-379. — 1980.*
- Wegman D. D. // Superalloys 1998. — 1988. — P. 427–436.*
- Fu J., Zhao J. H., Wang H., Xu G. Y. // Proc. 9th Intern. vacuum metallurgy conf. — 1988. — P. 722–732.*
- Zhengbong Li. // Ibid. — P. 732–744.*
- Xie X. S., Fu J., Gao L., Liu X. K. // Ibid. — P. 744–756.*
- Menzies R. G., Adascik C. B. // Proc. 8th Intern. conf. on vacuum metallurgy. — 1986. — P. 65–73.*
- Choudhury A. // ISIJ. — 1982. — 32 (5). — P. 563–574.*
- Ballantyne A. S. // PhD Thesis University of British Columbia, 1974.*
- Jackman L. A. et al. // Superalloys 71, 625 and 706. — 1994. — P. 153–167.*
- Rao A. V. // PhD Thesis. — Michigan State University, 1973.*
- Ballantyne A. S., Mitchell A., Wadier J.-F. // Proc. 6th Intern. vacuum metallurgy conf. — New York, 1979. — P. 599–623.*
- Zanner F. J., Williamson R. L., Harrison R. // Proc. 9th Intern. vacuum metallurgy conf. — 1988. — P. 551–568.*
- Yu K. O., Domingue J. A. // Superalloy 718. — P. 33–48.*
- Evans M. D., Kruzyński G. E. // Superalloys 1988. — 1988. — P. 91–100.*
- Evans M. D. // Proc. 8th Intern. vacuum metallurgy conf. — New York, 1986. — P. 125–131.*
- Patel S. J., Siddall R. J. // Proc. Intern. conf. on liquid metals. — 1994. — P. 318–325.*
- Petit P., Fesland J. P. // Superalloys 718, 625 and 706. — 1997. — P. 141–153.*
- Mitchell A. // Titanium '98. — 1998. — P. 91–104.*
- Shamban C. F., Hunter G. B. // Proc. 10th Intern. vacuum metallurgy conf. — 1989. — P. 3–11.*
- Medovar B. I., Medovar L. B., Tsukolenko A. K., Chernets A. V. // Proc. Intern. conf. on liquid metals. — 1999. — P. 168–176.*
- Beall R. A., Calvert E. D., Clites P. G., Dunham J. T. // Proc. 1st Intern. symp. on electroslag technology. — Pittsburgh, 1967. — P. 1–19.*
- Gurevich S. M. et al. // Avtom. svarka (in English). — 1963. — 16. — P. 27–33.*

Ун-т Британ. Колумбия, Ванкувер, Канада

Поступила 05.10.2008



ПЛАЗМЕННО-ДУГОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.745.5:669.15/26

ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ ПЕРЕПЛАВ ОТХОДОВ ТАНТАЛА

В. Р. Бурнашев

Исследовано влияние плазменно-дугового переплава (ПДГП) на кинетику удаления примесей из отходов tantalа. Определено, что изменение технологических режимов ПДГП приводит к интенсивному рафинированию tantalа от углерода, железа, молибдена и марганца. Отмечена перспективность переработки отходов tantalа способом ПДГП для получения компактных заготовок массой до 11 кг.

The effect of plasma-arc remelting (PAR) on kinetics of removal of impurities from titanium wastes was investigated. It was determined that change in technological conditions of PAR leads to the intensive refining of tantalum from carbon, iron, molybdenum and manganese. The prospects for recycling of tantalum wastes by the PAR method for producing compact billets of up to 11 kg mass were outlined.

Ключевые слова: плазменно-дуговая гарнисажная плавка; отходы; tantal; кинетика; удаление; примеси; заготовка

Тантал характеризуется весьма ценными свойствами — высокой температурой плавления, низким давлением паров и малой скоростью испарения при 1500...2000 °C, способностью к эмиссии и поглощению газов, что позволяет изготавливать из него детали электровакуумных приборов. Последнее свойство используют для поддержания глубокого вакуума в радиолампах и других электронных приборах [1–6].

Плавку tantalа применяют как технологическую операцию для достижения двух целей:

— получения компактных заготовок для последующей обработки [7];

— рафинирования металла от примесей [8].

Поскольку tantal имеет высокое сродство к кислороду и углероду, применение для его плавки оксидных материалов или графита приводит к сильному загрязнению примесями. Это оказывает отри-

цательное влияние на механические свойства tantalа, в частности на снижение пластичности. По этой причине плавку осуществляют в медных водоохлаждаемых тиглях.

Исходными материалами для выплавки слитков служат черновые металлы, полученные карбо- или алюмотермическим способами, спеченные штабики tantalа, а также отходы tantalового производства.

Важное значение имеет применение tantalа для изготовления конденсаторов. Здесь использована способность tantalа к образованию устойчивой оксидной пленки при электролитическом анодном окислении. Tанталовые элементы конденсаторов изготавливают из tantalовой фольги толщиной примерно 0,013 мм или из tantalового порошка, который прессуют и спекают при 2000 °C в пористые таблетки (пористость 30...50 %).

В случае применения твердого электролита таблетку после анодного окисления пропитывают раствором $Mn(NO_3)_2$ и нагревают для превращения нитрата в MnO_2 . После многократного повторения операции на пленке Ta_2O_5 образуется покрытие из MnO_2 . Затем таблетки покрывают электропроводным углеродом [4, 5]. После окончания эксплуатации конденсаторы подлежат утилизации.

Вовлечение в производство отходов tantalа в виде элементов конденсаторов имеет важное народнохозяйственное значение ввиду больших объемов утилизации военной и гражданской техники, выведенной из эксплуатации.

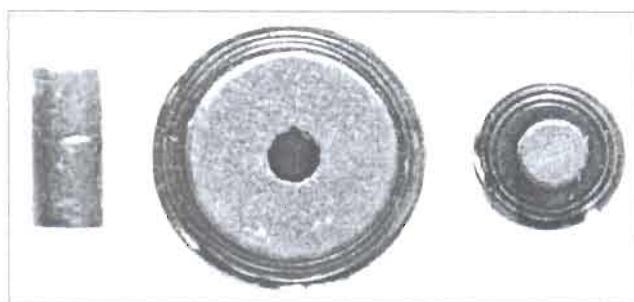


Рис. 1. Отходы радиодеталей, подготовленные к переплаву

© В. Р. БУРНАШЕВ, 2008



Утилизация отходов tantalа является очень трудоемкой операцией. Вначале конденсаторы освобождают от металлических капсул (рис. 1), а затем подвергают сплавлению.

Важное значение при переработке tantalовых деталей конденсаторов приобретает контроль за примесями химических элементов и соединений, используемых при их изготовлении (нержавеющая сталь, марганец, молибден, коллоидный углерод) [6]. Примеси из tantalа могут удаляться в атомарном состоянии (железо, кремний, алюминий, титан и другие металлы) и в молекулярном (азот и летучие оксиды типа CO , SiO_2 , NbO , TaO , Al_2O_3) [4–6].

В настоящей работе проведены эксперименты по исследованию влияния плазменно-дугового переплава (ПДП) на кинетику удаления примесей из tantalовых деталей конденсаторов.

Экспериментальные кинетические кривые испарения примесей в tantalе получали по данным опытов, выполненных с различной продолжительностью выдержки металла под плазмой. Опыты проводили на установке ОБ1957 в аргоне и гелии. Использовали медный водоохлаждаемый стол с десятью полусферическими лунками, размер которых выбран таким образом, чтобы зона анодного пятна закрывала зеркало жидкого металла.

Масса одного образца составила 50 г. Выдержка образца под плазмой в течение 180 с длилась до полного расплавления образца, следующего — 360 с, последнего — 720 с.

С применением методов спектрального и химического анализа определено, что основными примесями в исследуемых отходах tantalа являются железо, марганец, углерод и молибден.

В процессе исследований меняли такие технологические параметры, как ток и состав плазмообразующего газа. Следует отметить, что углерод, железо и молибден испаряются или всыпаются в виде включений в течение всего времени воздействия на образец плазмой. Увеличение тока от 650 до 750 А, а также применение в качестве плазмообразующего газа смеси аргона и гелия (в соотношении 1:1 по объему) приводит к увеличению скорости удаления

Химический состав tantalа исходного и переплавленного способом ПДП

№ пла- зы	Состав	Массовая доля элементов, %			
		Ta	Fe	Mn	Mo
1	Исходное	90,995	7,229	0,288	1,517
	После ПДП	98,820	0,572	Не обнару- женено	0,601
2	Исходное	98,387	0,723	0,337	0,567
	После ПДП	99,674	0,286	Не обнару- женено	0,078
3	Исходное	99,629	Не обнару- женено	*	0,371
	После ПДП	99,719	*	*	0,28

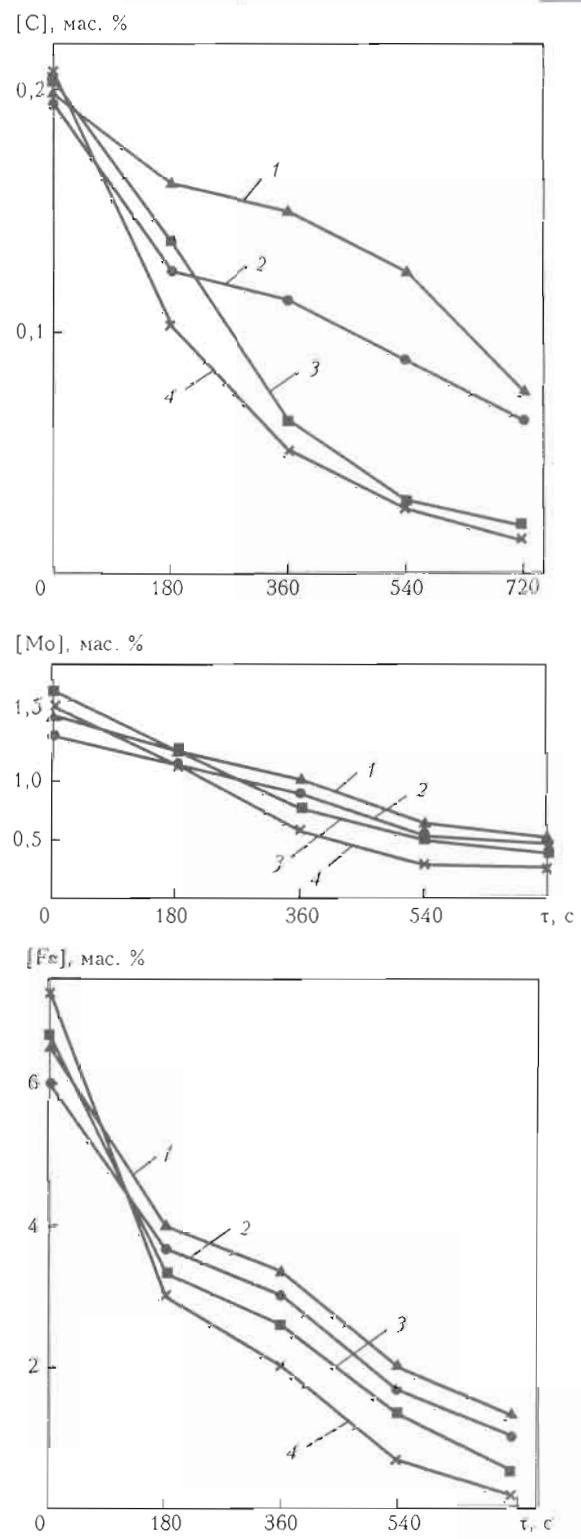


Рис. 2. Поведение примесей при переплаве отходов tantalа: 1 — аргон, $I = 650 \text{ A}$; 2 — аргон, $I = 750 \text{ A}$; 3 — аргон + гелий, $I = 650 \text{ A}$; 4 — аргон + гелий, $I = 750 \text{ A}$

примесей, о чем свидетельствуют наклон кинетических кривых (рис. 2).

Что касается кинетики испарения марганца, то установить какую-либо закономерность не удалось из-за его сильного испарения в самом начале расплавления. После воздействия плазмы на tantalевые образцы в течение 360 с марганец не обнаружен.

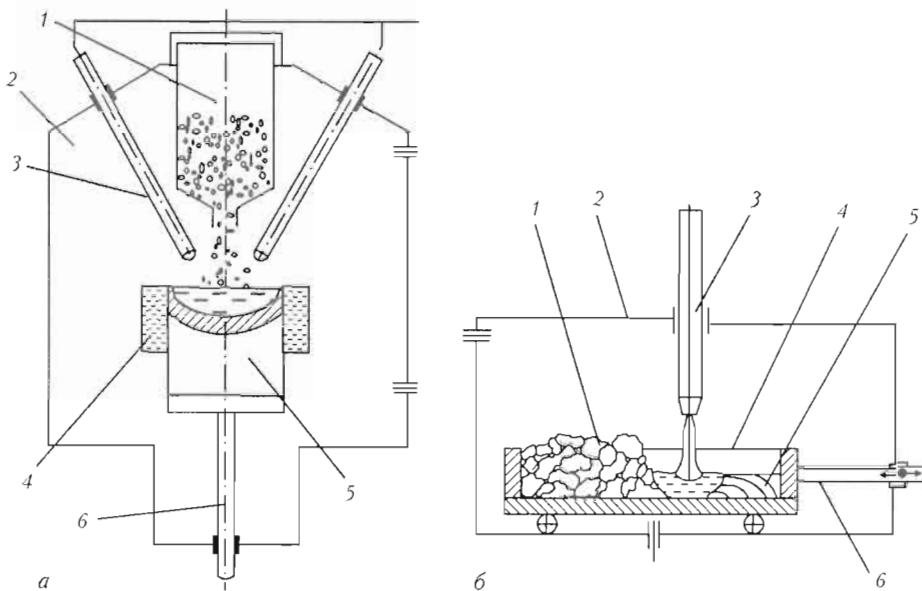


Рис. 3. Схемы установок УПП-3 (а) и ОБ1957 (б): 1 — шихта; 2 — плавильная камера; 3 — плазмотрон; 4 — кристаллизатор; 5 — слиток; 6 — механизм вытягивания слитка

Материалный баланс примесей показал, что при воздействии плазменной дуги на tantalевые элементы конденсаторов в течение 720 с происходит интенсивное рафинирование от углерода (в 10...12 раз), железа (в 15 раз), молибдена (в 3...5 раз) и марганца (полностью).

С учетом указанных результатов проведены эксперименты по получению плоских и круглых заготовок tantalа из отходов tantalевых конденсаторов. Компактирование отходов tantalа в круглую заготовку выполняли в плазменно-дуговой печи УПП-3, оснащенной проходным медным водоохлаждаемым кристаллизатором (рис. 3, а).

Плавку начинали с загрузки отходов на медную водоохлаждаемую затравку. Камеру печи откачивали вакуумно-дуговым насосом ВН2 до $1 \cdot 10^{-1}$ МПа. Затем рабочее пространство заполняли аргоном и расплавляли шихту. Расплавленный металл выдерживали под плазмой 25...30 мин для рафинирования от примесей. Масса одной засыпки составляла 1,2...1,5 кг. Затем металл охлаждали и делали следующую засыпку, повторяя эту операцию несколько

раз. В результате получили слитки tantalа диаметром 100 мм, массой 7...11 кг (рис. 4, а). При этом на компактирование и рафинирование tantalа от примесей расходуется от 9 до 15 кВт·ч/кг электроэнергии.

Переплав отходов tantalа в плоскую заготовку выполняли в печи ОБ1957 по схеме, приведенной на рис. 3, б. В плоский медный водоохлаждаемый кристаллизатор загружали отходы tantalевых конденсаторов. Толщина заготовки составляла 30...40 мм, масса одной порции — 8...9 кг.

При плавке по этой схеме в качестве плаズмообразующего газа использовали смесь аргона и гелия. Процесс начинали с расплавления ванны жидкого металла по ширине кристаллизатора. Затем кристаллизатор перемещали с небольшой скоростью. В результате получали заготовки размерами 300×80×20.

Проведенные исследования показали, что основными примесями в исследуемых отходах tantalа являются железо, марганец, молибден и углерод. В зависимости от времени выдержки резко снижается содержание железа (в 10 раз) и молибдена

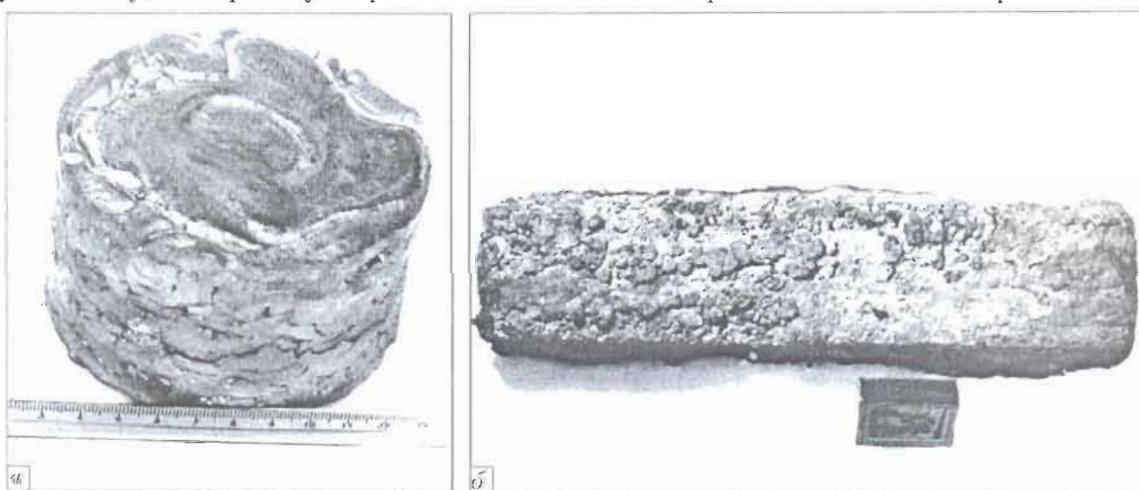


Рис. 4. Внешний вид скомпактированной заготовки из tantalа круглой (а) и плоской (б) форм



(в 2,5 раз), после переплава практически не обнаруживается марганец (таблица). Уменьшается содержание углерода (рис. 2).

Выявлено, что чем меньше тантал загрязнен примесями, тем труднее их удалить. От содержания примесей зависит и плотность металла: чем их меньше, тем выше плотность металла.

Установлено, что качество боковой поверхности скомпактированной заготовки зависит от нескольких факторов:

массы засыпки (чем меньше засыпка, тем лучше поверхность);

энергетических параметров плавки (чем больше вкладывается энергии, тем лучше качество поверхности);

качества предварительной подготовки шихты.

В целом следует отметить перспективность переработки отходов тантала способом ПДП и ее модификаций как для рафинирования от примесей, так и для формирования компактных заготовок небольшой (2...3 кг) и средней (7...11 кг) массы (рис. 4).

1. Физические величины. Справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1231 с.
2. Козина Л. Н., Ревякин А. В., Громова М. М. Растворимость азота в жидким tantalе и ванадии // Физико-химические основы взаимодействия жидкого металла с газами и шлаками. — М.: Наука, 1978. — С. 51–64.
3. Кипарисов С. С., Левинский Ю. В. Азотирование тугоплавких металлов. — М.: Металлургия, 1972. — 160 с.
4. Ниобий и tantal / А. Н. Зеликман, Б. Г. Коршунов, А. В. Елютий, А. М. Захаров. — М.: Металлургия, 1980. — 290 с.
5. Киффер Р., Браун Х. Ванадий, ниобий, tantal / Пер. с нем.; под ред. Е. М. Савицкого. — М.: Металлургия, 1968. — 311 с.
6. Зеликман А. Н. Металлургия редких металлов. — М.: Металлургия, 1980. — 328 с.
7. Варич И. Ю., Ахонин С. В., Тригуб Н. П. Утилизация лома tantalа способом электронно-лучевой плавки // Современ. электрометаллургия. — 2005. — № 3. — С. 44–46.
8. Ахонин С. В. Эффективность рафинирования и потери на испарение при электронно-лучевой плавке tantalа // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2000. — № 3. — С. 33–37.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 04.08.2008

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ



Объявляет ежегодный набор по следующим специальностям:

ДОКТОРАНТУРА

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

АСПИРАНТУРА

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

Прием документов проводится в сентябре.

Контактный телефон: 289-84-11.

*Подробная информация на сайте института (раздел аспирантура): [www: paton.kiev.ua](http://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

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПРИ ОТЖИГЕ БЫСТРОЗАКАЛЕННОГО СПЛАВА ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ ВЫПЛАВКИ

Г. Н. Кожемякин, Н. Н. Луговой, В. А. Шаповалов,
Ю. А. Никитенко, О. Н. Иванов, Д. А. Колесников

Изучено влияние отжига при температуре 300 °C на формирование нанокристаллов в сплаве Ni-Si-B с аморфной структурой. Обнаружено неоднородное распределение нанокристаллов размерами 10...84 нм в приповерхностном слое сплава глубиной до 10 мкм. Количество и размеры нанокристаллов уменьшаются от поверхности в глубь сплава с аморфной структурой.

The effect of annealing at temperature 300 °C on the formation of nanocrystals in alloy with amorphous structure Ni-Si-B was studied. The non-uniform distribution of nanocrystals of 10...84 nm sizes in a near-surface layer of alloy at up to 10 mm, was revealed. Amount and sizes of nanocrystals are decreased from the surface into the depth of amorphous alloy.

Ключевые слова: плазменно-дуговой нагрев; аморфное состояние; отжиг; нанокристаллы

Сплавы с аморфной структурой характеризуются высокой коррозийной стойкостью и применяются для изготовления электродных материалов, топливных элементов, фильтров, работающих в растворах кислот и сточных водах, а также материалов, предназначенных для технологического оборудования при производстве соды и др. Особый интерес представляют сплавы с аморфной структурой, применяемые в качестве припоев [1]. Отжиг способствует кристаллизации таких сплавов и изменяет их свойства [2–4]. В этой связи актуальным является изучение влияния температуры на изменение микроструктуры указанных сплавов.

Целью настоящей работы является изучение влияния отжига сплава с аморфной структурой системы Ni-Si-B на изменение его структуры.

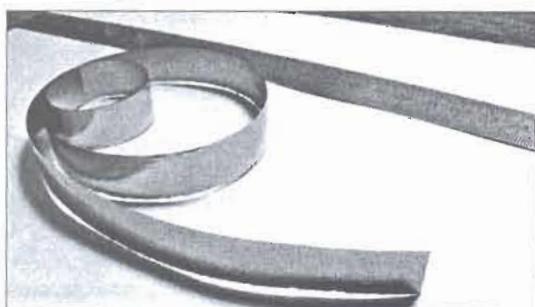


Рис. 1. Лента сплава с аморфной структурой на основе никеля

© Г. Н. КОЖЕМЯКИН, Н. Н. ЛУГОВОЙ, В. А. ШАПОВАЛОВ, Ю. А. НИКИТЕНКО, О. Н. ИВАНОВ,
Д. А. КОЛЕСНИКОВ, 2008

Для исследований выбрали сплав на основе никеля следующего состава, мас. %: 88 Ni; 7 Si; 3,5 B; 0,5 Fe; 1,0 Cr. Сплав получали в виде ленты способом спиннингования с применением плазменно-дуговой плавки в медном водоохлаждаемом гарнисажном тигле. Схему разработали как альтернативу классической технологии спиннингования из керамического тигля.

Применение гарнисажной плавки позволяет снизить площадь контакта расплава с керамикой и защитить от попадания в расплав неметаллических включений, а плазменно-дуговой источник отличается большим запасом мощности [5] и возможностью перегрева расплава в широком интервале температур. Шихту готовили из указанных исходных материалов чистотой 99,99 %, которую помещали в медный водоохлаждаемый тигель с внутренним диаметром 110...140 мм и высотой 50 мм в аргоновой плазме. Температура расплава в процессе спиннингования составляла около 1100 °C.

После расплавления шихты и выхода на стационарный режим в камеру резко подавали избыточное давление 5 кПа, и расплав выдавливался на поверхность диска через керамическое сопло, установленное в донной части медного тигля.

Для осуществления сверхбыстрой закалки расплава применяли медный диск-холодильник диаметром 300 мм, вращающийся с частотой 1600 об/мин. Сплав с аморфной структурой получали в виде ленты толщиной около 60 мкм, шириной 1,5 мм и длиной 30...40 м. Внешний вид полученного сплава представлен на рис. 1.

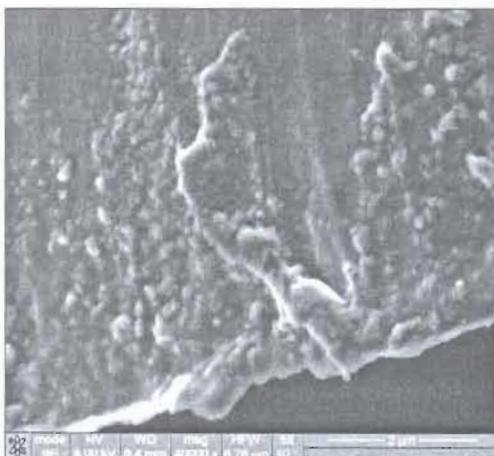


Рис. 2. Нано- и микрокристаллы у поверхности ленты с аморфной структурой после отжига при температуре 300 °С

Из ленты с аморфной структурой приготовлены образцы размерами 15,00×8,00×0,06 мм, которые подвергались отжигу на воздухе при температуре 300 °С в специальной цилиндрической печи с минимальным градиентом температуры в осевом и радиальном направлениях. Поверхность поперечного сечения образцов для изучения микроструктуры получали при помощи разрыва в жидком азоте. Исследовали микроструктуру с помощью растрового электронного микроскопа «Quanta 200 3D».

Установлено, что в неотожженных образцах отсутствовали микро- и нанокристаллы как на поверхности, так и в поперечном их сечении, т. е. лента имела аморфную структуру по всему сечению.

При визуальном осмотре отожженных образцов не обнаружили изменения геометрических размеров и оксидной пленки на поверхности. Однако с помощью электронного микроскопа в поперечном сечении образцов зафиксировали нано- и микрокристаллы. Нанокристаллы размерами 10...84 нм обнаружены в приповерхностной области ленты с аморфной структурой глубиной до 10 мкм (рис. 2). Их концентрация и размеры уменьшались от поверхности в глубь образца. Причем наиболее мелкие нанокристаллы размещались на глубине более 8 мкм.

На поверхности сплава зафиксированы выступы, образованные, как правило, микрокристаллами, сосредоточенными у поверхности аморфной ленты. Микрокристаллы имели неправильную форму, близкую к овальной, размерами 220...680 нм. Вероятно, эти микрокристаллы сформировались в процессе отжига из первых нанокристаллов, зародившихся на поверхностных дефектах.

Обнаружено также возникновение нанокристаллов в деформированных областях в результате раз-

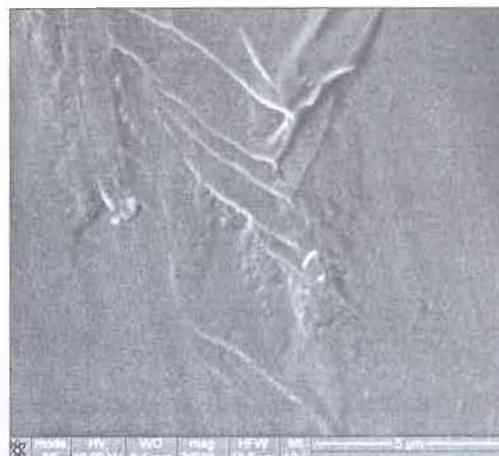


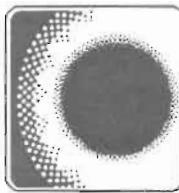
Рис. 3. Нанокристаллы в деформированной области

рыва образцов в жидком азоте (рис. 3). Эти области имели характерный вид изломов, сопутствующих разрушению кристаллов.

Таким образом, отжиг при температуре 300 °С сплава с аморфной структурой на основе никеля способствует формированиюnano- и микроструктуры с размерами кристаллов 10...680 нм. Зарождение кристаллов начинается у поверхности ленты, а в процессе отжига центры кристаллизации формируются на ее большей глубине. Обнаружено также образование нанокристаллов в областях сплава, подвергнутых деформации.

1. Применение быстрозакаленных припоев для пайки конструктивных элементов термоядерных реакторов / Б. А. Калин, О. Н. Севрюков, В. Г. Федотов, А. Н. Плющев // Технология машиностроения. — 2003. — № 4. — С. 45–50.
2. Lu K., Wang J. T., Wei W. D. Thermal expansion and specific heat capacity of nanocrystalline Ni-P alloy // Scripta Metall. Mater. — 25, № 3. — 1991. — Р. 619–623.
3. Влияние деформации и отжига на структуру и свойства аморфных сплавов / Н. И. Носкова, Н. Ф. Вильданова, А. П. Потапов, А. А. Глазер // Физика металлов и металловед. — 73, № 2. — 1992. — С. 102–110.
4. Влияние предварительной деформации и низкотемпературного отжига на размер нанокристаллов Fe73.5Cu1Nb3Si13.5B9, полученных при кристаллизации аморфной ленты / Н. И. Носкова, Е. Г. Пономарева, А. А. Глазер // Физика металлов и металловед. — 76, № 5. — 1993. — С. 171–173.
5. Шаповалов В. А., Никитенко Ю. А., Бурнашев В. Р. Применение донного слива при плазменно-дуговой гарниажной плавке. // Современ. электрометаллургия. — 2004. — № 4. — С. 12–17.

Восточноукр. нац. ун-т им. В. Даля, Луганск
Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Белгород. гос. ун-т, НСМН-ИКП, Белгород
Поступила 24.09.2008



ДЕФОРМАЦИИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КАПЛИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ

П. Шапель, А. Жарди, Д. Аблизер,
Ю. М. Помарин, Г. М. Григоренко

Описаны экспериментальные и численные исследования формы и переходной (неустановившейся) деформации свободной поверхности жидкой капли сплава 80 % Ni–20 % Cr во время левитационной плавки. С использованием скоростной визуализации и обработки изображений определены частоты колебания свободной поверхности капли. Установлено, что изменения температуры металла в диапазоне 1650...1750 °C оказывают несущественное влияние на эти частоты и среднюю форму капли. Представлена двухмерная модель переходного процесса, учитывающая полностью связанный характер электромагнитных явлений, турбулентное течение жидкого металла в капле и изменения формы капли. Показано, что результаты моделирования, полученные на основе оценки тока в катушке, позволяют достаточно точно прогнозировать среднее положение и форму капли, обнаруженные во время эксперимента.

Experimental and numerical investigations of shape and transient (non-steady) deformation of a free surface of a molten drop of alloy 80 % Ni–20 % Cr during the levitation melting were described. Using a high-speed visualization and processing of images, the frequencies of oscillation of a drop free surface were determined. It was found that the change in metal temperature in the range of 1650...1750 °C has a negligible influence on these frequencies and medium shape of the drop. Two-dimensional model of transient process is presented, accounting completely for interlinked nature of electromagnetic phenomena, turbulent flow of molten metal in a drop and change in the drop shape. It is shown that the results of modeling obtained on the basis of estimation of current in a coil, allow predicting sufficiently precisely the middle position and shape of drop revealed during the experiment.

Ключевые слова: электромагнитная левитация, свободная поверхность, скоростная видеосъемка, числовое моделирование

Введение. Понимание механизмов массопереноса и реакций между жидким металлом и газовой фазой имеет большое значение для оптимизации некоторых металлургических процессов, включая дегазацию сталей и сплавов. Для исследования реакций между газом и жидким металлом наиболее подходящим является лабораторный способ взвешенной капли [1], который заключается в плавлении и левитации металлического образца в катушке, питаемой переменным током высокой частоты. Применение электромагнитной левитации для исследования реакций между газом и жидким металлом обеспечивает создание среды, не содержащей загрязнителей, без использования тигля или подложки; получение большой контактной поверхности и эффективное перемешивание жидкого металла, что способствует быстрому достижению равновесия в системе газ–жидкость.

Способ взвешенной капли используется в ИЭС им. Е. О. Патона для исследования азотирования и деазотирования различных жидких металлических сплавов, включая химически активные (титан, цирконий, хром) и хромоникелевые сплавы (например, суперсплавы на основе никеля). Эксперимент по левитации заключается в воздействии при постоянной температуре на взвешенный образец расплава потока газообразного азота в течение контролируемого периода времени. Содержание газа в металле определяют различными способами после затвердевания образца. Такие эксперименты позволяют установить растворимость газа в металле при заданной температуре, а также получить данные о кинетике общего реактивного перехода азота на границе раздела газ–жидкий металл.

Однако полученных экспериментальных данных недостаточно для точного определения предельного значения переноса азота. Поэтому параллельно в Горной школе (Нанси) проведено числовое моделирование эксперимента со взвешенной каплей, основной целью которого было установление возможности прогнозирования изменения содержа-



ния азота в металлическом образце в зависимости от времени в процессах азотирования и деазотирования. Для этого требовалось смоделировать поток жидкого металла в капле под воздействием электромагнитных сил. Данный подход уже обеспечил достаточно четкое описание поведения азота в эксперименте Сивертса [2].

Еще один важный аспект в описании общего масопереноса между каплей и окружающим газом заключается в определении геометрии взвешенной капли, что в свою очередь способствует определению межфазной поверхности. Основное внимание в данной работе уделяли именно этому последнему аспекту, исследование которого послужило первым этапом в построении полной модели эксперимента по левитации. При этом скоростную визуализацию совмещали с моделированием методами вычислительной гидродинамики для определения и прогнозирования формы, а также переходной деформации свободной поверхности капли. Изучали также влияние температуры металла на деформацию капли.

Описание эксперимента. На рис. 1 представлена экспериментальная установка. Опыты производили в кварцевой трубке диаметром 17,4 мм. Вокруг трубы устанавливали индукционную катушку из шести витков, при этом сверху были размещены два встречных витка. Питание катушки обеспечивалось генератором частотой 66 кГц и выходной мощностью 7 кВт. В данной работе использовали сплав 80 % Ni–20 % Cr.

Образцы массой приблизительно 1 г имели исходный диаметр 3 мм. Движение и форму взвешенного образца регистрировали при помощи скоростной видеокамеры (1000 кадр/с, 768×768 пикселей), размещенной перед установкой для левитации. Сбоку под углом 45° установили зеркало для одновременной визуализации фронтальной и поперечной поверхностей образца. Это позволило получить некоторую информацию о трехмерных геометрических характеристиках капли.

Температуру поверхности жидкого металла измеряли пирометром, помещенным над образцом. Эксперименты проводили при значениях температуры 1650, 1700 и 1750 °C. В процессе плавления вокруг образца поддерживали атмосферу инертного газа (аргона) для предотвращения попадания примесей в жидкий металл вследствие реакции с окружающим воздухом.

С целью количественного определения геометрии и динамики взвешенной капли использовали фирменную компьютерную программу, разработанную для последующей обработки видеоизображений, которая позволяет автоматически определять края капли на каждом цифровом изображении, а также рассчитывать площадь и координаты центра тяжести на поверхности, ограниченной указанными краями (т. е. кажущееся поперечное сечение капли в плоскости наблюдения). Затем выполняли спектральный анализ развития последних параметров

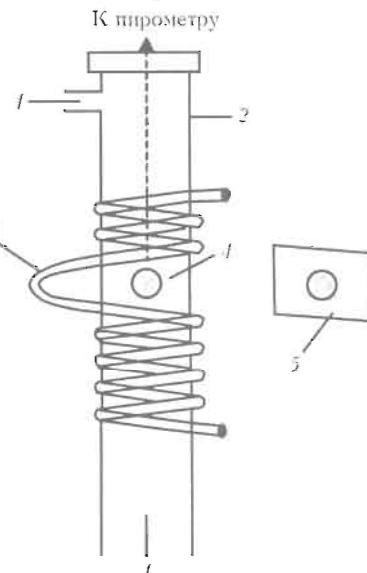


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – газ; 2 – кварцевая трубка; 3 – обратный виток индукционной катушки; 4 – жидкая капля; 5 – зеркало под углом 45°

во времени для определения характеристических частот динамики системы.

Взвешенная капля отличается сложными динамическими характеристиками. Форма капли сильно искажается, по сравнению со сферической. Капля подвергается непрерывным колебаниям на свободной поверхности, а также периодическим поступательным перемещениям в нескольких направлениях относительно равновесного положения и (в определенных условиях) вращения. В данном разделе представлены основные результаты нашего исследования характеристик свободной поверхности.

На рис. 2 дан пример временных изменений на фронтальной и поперечной поверхностях сечения капли. Также приведены видеоизображения фронтальной и поперечной поверхностей капли в различные моменты времени. На фронтальном изображении отсутствует нижняя часть капли, что обусловлено блокировкой изображения катушкой. Эксперимент проводили при температуре 1700 °C. Площади поперечного сечения со временем быстро изменялись, при этом колебания изображений фронтальной и поперечной поверхностей не совпадали по фазе. Амплитуда колебаний имела только относительное значение. Такие колебания площади поперечного сечения отражают колебания свободной поверхности капли, вызванные силами поверхности натяжения, влиянием магнитного давления и конвекцией жидкого металла. Спектральный анализ колебаний (с учетом 3000 кадров) показал наличие подобного доминирующего пика при частоте приблизительно 39 Гц на изображениях фронтальной и поперечной поверхностей.

Следует отметить, что изучение частотного спектра показало наличие серии частотных пиков, расположенных близко друг к другу и равных примерно 39 Гц (по 8 пиков для изображений фронтальной и поперечной поверхностей). Множество таких пиков свидетельствует о сложной динамике колебаний капли.

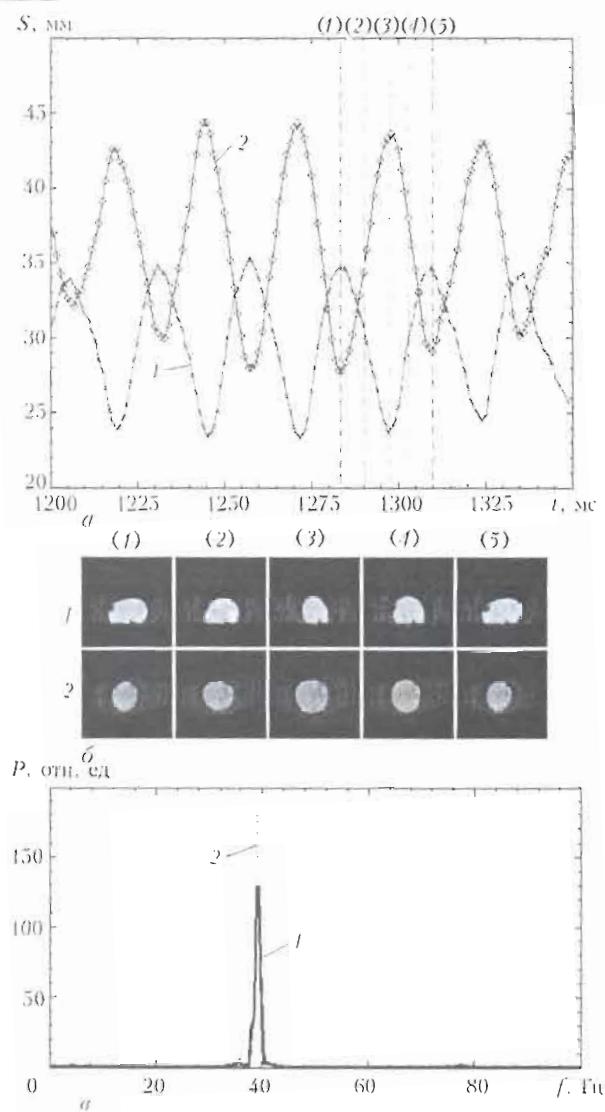


Рис. 2. Фронтальное и поперечное сечения капли в зависимости от мощности P : а — изменения колебаний со временем; б — видеоизображения в различные моменты времени; в — энергетические спектры колебаний Фурье; 1 — вид сбоку; 2 — вид сверху; (1)–(5) — форма капли в разные моменты времени

Как видно из рис. 2, мгновенная геометрия капли сильно отличается от сферической и является неосимметричной. Сечения фронтальной и поперечной поверхностей можно аппроксимировать как эллиптические. В полупериоде большая ось фронталь-

Таблица 1. Влияние температуры металла на частоту колебаний площади поперечного сечения капли

Температура металла, °C	Частота колебаний, Гц, при сечении	
	фронтальном	поперечном
1650	40,5	40,5
1700	37,7	37,5
1750	39	39

Примечание. Данные при температурах 1650 и 1700 °C представляют собой средние значения двух серий измерений.

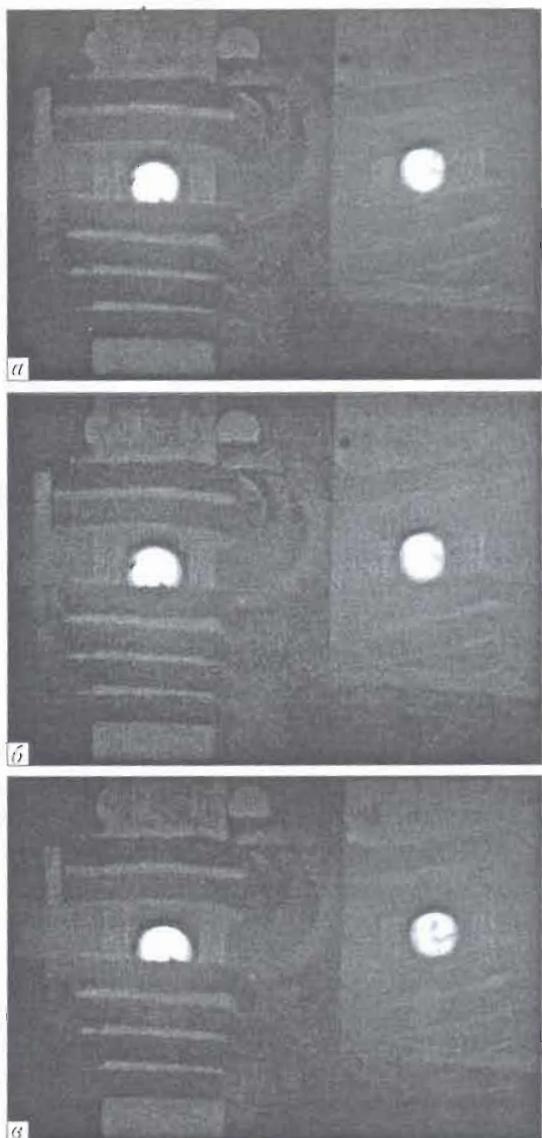


Рис. 3. Влияние температуры T металла на среднюю форму капли (слева — вид фронтальной поверхности; справа — вид поперечной поверхности): а — 1650; б — 1700; в — 1750 °C

ного сечения колеблется между двумя наклонными перпендикулярными направлениями.

В табл. 1 даны измеренные значения частоты колебаний площади сечения при трех различных значениях температуры жидкого металла. Следует отметить, что для температуры 1650 и 1700 °C они представляют собой усредненные результаты по двум сериям измерений. Как видно из табл. 1, в ограниченном диапазоне исследований температура не имеет существенного значения. Разброс результатов находится в пределах экспериментальной неопределенности.

На рис. 3 приведены видеоизображения фронтальной и поперечной поверхностей капли при трех различных значениях температуры, усредненные по нескольким периодам колебаний площади поперечного сечения, которые получены путем усреднения 400 последовательных кадров (соответствующих временному периоду 0,4 с).

Интересно отметить, что после усреднения фронтальные и поперечные поверхности капли ста-



новятся похожими друг на друга так, что средняя геометрия капли относительно близка к осесимметричной. Установлено, что в исследованном температурном диапазоне температура не воздействует заметно на среднюю форму капли, в отличие от ощущенного влияния на среднее положения капли. С повышением температуры уменьшается высота капли в катушке (рис. 3), что объясняется снижением мощности питания катушки при возрастании температуры (7,5; 6,9; и 6,0 кВт соответственно при 1650, 1700 и 1750 °C).

Числовое моделирование. Моделирование поведения взвешенных электромагнитным способом капель является предметом многих исследований с применением различных аналитических и численных методов. При этом актуальной задачей является комплексное описание системы, включающее связь между электромагнитным полем, изменением формы жидкого металла и потока жидкости в капле.

Большинство исследований посвящено определенным ограниченным аспектам данной проблемы и основано на использовании некоторых упрощающих допущений, в частности, только в некоторых из них учитывается динамическое воздействие потока расплава на форму свободной поверхности [3–5]. Наиболее важной в данной области является недавняя работа Бояревича и Периклеуса (Bojarevics and Pericleous [5]), где описана модель при помощи которой рассчитаны с применением спектральных методов решения тепловые поля и поля потоков в осесимметричной взвешенной капле одновременно с колебаниями свободной поверхности.

Описание модели. Указанная модель описывает осесимметричную каплю жидкого металла. Как следует из предыдущего раздела, предположение осесимметричности не полностью отражает реальность. Однако считается, что для исследования эффектов первого порядка достаточно двумерного расчетного анализа. Наш основной интерес заключается в прогнозировании переходных изменений в форме капли. Модель описывает следующие три аспекта:

расчет распределения электромагнитного поля, полученного с применением катушки индуктивности внутри и снаружи капли, а также распределение сил Лоренца, действующих на жидкую каплю;

определение турбулентного потока жидкого металла, образовавшегося в капле под воздействием сил Лоренца;

анализ деформации формы свободной поверхности капли.

В частности, предлагаемая модель учитывает влияние как электромагнитного поля, так и динамики внутренних потоков в капле на форму ее свободной поверхности. В качестве первого шага при разработке полной модели, поскольку предполагается, что капля является изотермической, не учитывают явления тепло- и массопереноса.

Расчет электромагнитной силы. Электромагнитная сила в жидкой капле обусловлена взаимодействием

между током и магнитным полем. Последнее определяется векторным потенциалом $\vec{A} (\vec{B} = \nabla \vec{A})$, который в случае осесимметричности является полностью азимутальным ($\vec{A} = A_0 \hat{e}_\theta$). Векторный потенциал должен удовлетворять следующему уравнению, выведенному из уравнений Максвелла (калибровочное условие кулоновского потенциала):

$$\nabla^2 \underline{A}_0 - \frac{\underline{A}_0}{r^2} = \mu \sigma \frac{\partial \underline{A}_0}{\partial t} - \underline{J}_{ex}, \quad (1)$$

где μ — магнитная проницаемость; σ — электропроводность металла; \underline{J}_{ex} — плотность тока, циркулирующего в катушке. Следует отметить, что конвекционный член, связанный со скоростью потока ($\vec{A} \vec{x} u$), не учитывается в данном уравнении, что оправдано ввиду довольно высоких частот. В случае синусоидального тока значения поля удобно выражать с использованием понятия вектора. Например, векторный потенциал представлен сложной экспоненциальной функцией $\underline{A}_0 e^{i\omega t}$, где сложная амплитуда \underline{A}_0 имеет только пространственную зависимость, и ω является угловой частотой.

С учетом понятия вектора уравнение (1) можно переписать, используя сложную амплитуду:

$$\nabla^2 \underline{A}_0 - \frac{\underline{A}_0}{r^2} = j\mu\omega \underline{A}_0 - \underline{J}_{ex}. \quad (2)$$

Разложение указанного уравнения на реальные и мнимые части дает два связанных уравнения диффузионного переноса для реальной ($A_0 = Re(\underline{A}_0 e^{i\omega t})$) и мнимой части ($Im(\underline{A}_0 e^{i\omega t})$) сложного векторного потенциала.

С учетом решения для \underline{A}_0 плотность наведенного тока в жидкой капле J_0 можно определить путем соединения уравнения Максвелла-Фарадея и закона Ома:

$$J_0 = -j\omega \underline{A}_0. \quad (3)$$

И, наконец, получаемая в результате электромагнитная сила, действующая на жидкий металл и усредненная во времени за период переменного тока, определяется как

$$\vec{F} = <\vec{J}_0 \vec{B}> = 1/2 Re (\vec{J}_0 \vec{B}^*), \quad (4)$$

где верхний индекс * обозначает комплексно сопряженное число. Следует отметить, что переменную часть электромагнитной силы можно не учитывать, поскольку временной масштаб, связанный с инерцией жидкого металла, намного большие частоты тока катушки.

Моделирование потока. Явления течения описываются с помощью уравнений турбулентности Навье-Стокса. Вопрос выбора соответствующей модели турбулентности для систем взвешенных капель все еще остается открытым, поэтому применение тра-

Таблица 2. Выражения коэффициента диффузии Γ_ϕ и главного члена S_ϕ в уравнении (5) для различных переменных ϕ

Параметры	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Сплошная среда	1	0	0
Сохранение количества движения (радиальное)	u_r	μ_{eff}	$-\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_{eff} \frac{\partial u_z}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_{eff} \frac{\partial u_r}{\partial r}) - 2 \mu_{eff} \frac{u_r^2}{r^2} + \rho \frac{u_r^2}{r} + F_r$
Сохранение количества движения (осевое)	u_z	μ_{eff}	$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_{eff} \frac{\partial u_z}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_{eff} \frac{\partial u_r}{\partial z}) + \rho g + F_z$
Сохранение количества движения (азимутальное)	u_θ	μ_{eff}	$-\frac{u_\theta}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_{eff}) - \rho \frac{u_r u_\theta}{r}$
Сохранение k	K	μ_{eff} / α_k	$G_k - \rho e$
Сохранение ϵ	ϵ	$\mu_{eff} / \alpha_\epsilon$	$C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_3 \epsilon G_b) - C_2 \epsilon \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon$

диционной модели турбулентности RANS (типа k - ϵ или k - ω), хотя о ней чаще всего сообщается в литературе, вызывает сомнения. В данной работе мы использовали известную версию ренормализационной группы (RNG) модели k - ϵ , следуя рекомендациям, приведенным в работах [4, 6] и др., где на основе сравнительных численных исследований сделан вывод о преимуществах модели RNG над стандартной моделью k - ϵ для описания внутреннего течения во взвешенной капле. Уравнения Навье-Стокса и переноса турбулентности можно записать в общем виде с помощью уравнения конвекции-диффузии для переменной величины ϕ , которое имеет следующий вид в системе осесимметричных цилиндрических координат (r, θ, z):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u_r \phi) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z \phi) = \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z}) + S_\phi. \end{aligned} \quad (5)$$

Выражения коэффициента диффузии Γ_ϕ и старшего члена S_ϕ даны в табл. 2 для каждой переменной потока. Здесь μ_{eff} — эффективная динамическая вязкость, $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$, где μ и μ_t — соответственно молекулярная и турбулентная динамическая вязкость; F_r и F_z — радиальный и осевой компоненты электромагнитной силы в жидком металле; g — сила тяжести.

Турбулентную вязкость можно выразить через турбулентную энергию k , а скорость ее рассеяния ϵ можно описать следующим отношением:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}. \quad (6)$$

В случае закрученного потока модель RNG k - ϵ корректирует вязкость, данную в уравнении (6), с помощью весового коэффициента в виде $f(\Omega, k/\epsilon)$, где Ω — угловая скорость жидкой среды.

Член G_k , представляющий собой образование турбулентной кинетической энергии под воздействием градиентов скорости, выражен через функцию модуля тензора средней скорости деформации S

$$G_k = \mu_{eff} S^2. \quad (7)$$

Основное изменение относительно стандартной модели k - ϵ , за исключением коррекции турбулентной вязкости, заключается в наличии дополнительного члена R_ϵ в уравнении переноса скорости рассеяния ϵ :

$$R_\epsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta_{l0})}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (8)$$

$$\text{где } \eta = S^2, \quad \eta_0 = 4,38, \quad \beta = 0,012.$$

Все указанные константы модели турбулентности (C_μ , $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$, α_k , α_ϵ) принимаются равными рекомендованным значениям, приведенным в руководстве для пользователя [7].

Расчет деформации свободной поверхности. Для представления и прослеживания перемещения свободной поверхности капли используется известный метод VOF (объема жидкости). Впервые введенный Хертом и Николсон [8], он представляет собой метод поверхностного захвата, в котором используется фиксированная сетка Эйлера. Положение границы раздела между жидким металлом и окружающим газом описывается с использованием локальной функции F , представляющей собой объемную долю ячейки сетки, занятую металлом. Величина F равна единице в любой ячейке, заполненной металлом, 0 — в любой ячейке, заполненной газом, от 0 до 1 — в любой ячейке, содержащей границу раздела.

Перемещение границы раздела прослеживается путем решения уравнения чистой адvection для объемной доли:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r F) + \frac{\partial}{\partial z} (r u_z F) = 0. \quad (9)$$

Восстановление границы раздела по информации о поле объемной доли выполняется методом кусочно-линейного расчета границы раздела Юнга [9]. Для металла и газа используют один набор уравнений. В расчетных ячейках, содержащих свободную поверхность, физические свойства смеси

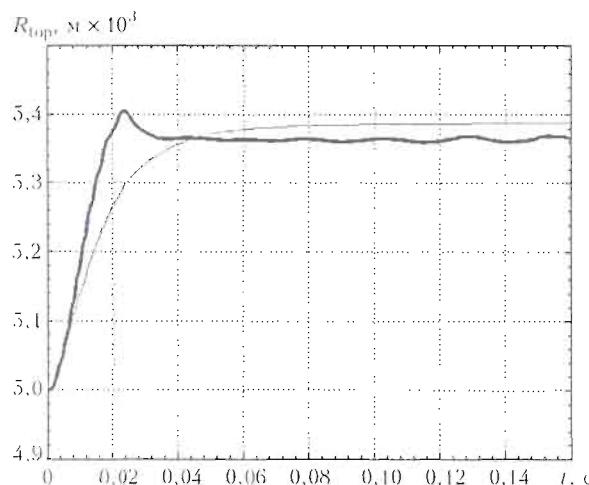


Рис. 4. Расчетные изменения во времени координаты z верхней центральной поверхности взвешенной капли в одном токовом контуре и сравнение с результатами моделирования Бояревича [12]: 1 — модель, разработанная в данном исследовании; 2 — модель Бояревича

жидкостей (плотность, вязкость), появляющиеся в уравнениях, выражены в виде средних значений свойств компонентов смеси, взвешенных по объемной доле каждой жидкости. Эффекты поверхностного натяжения по границе раздела моделируют с использованием модели поверхностного натяжения сплошной среды (CSF), предложенной в работе [10], которая заключается в выражении поверхностного натяжения в виде объемной силы, добавленной к старшему члену в уравнении количества движения (импульса).

Числовые аспекты. Модель построена с применением версии 6,2 промышленной программы FLUENT, представляющей собой пакет программ вычислительной гидродинамики (CFD) на основе метода конечных объемов для моделирования многофазного потока жидкости. Решающая программа FLUENT дополнена набором определяемых пользователем функций (UDF), разработанным в Лаборатории EPM-Madylam (пакет Induct2D) для расчета электромагнитного поля и силы Лоренца с использованием формулировки потенциала вектора напряженности магнитного поля [11]. Для числового решения уравнений потока используют алгоритм SIMPLEC. Основное преимущество данного подхода заключается в возможности рассмотреть все аспекты проблемы в единой системе расчетов, что позволяет достичь полной связи и избежать возможных проблем, связанных с интерполированием, при переводе данных из одного кода в другой. Следует, однако, отметить, что необходимость в использовании сетки, которая простирается за пределы области металлической капли, может вызвать повышение стоимости расчетов, по сравнению с более специализированными методами расчетов электромагнитного поля и формы свободной поверхности капли, где применяется сетка, покрывающая только область капли.

Результаты. Адекватность модели вначале проверяют путем моделирования контрольного примера,

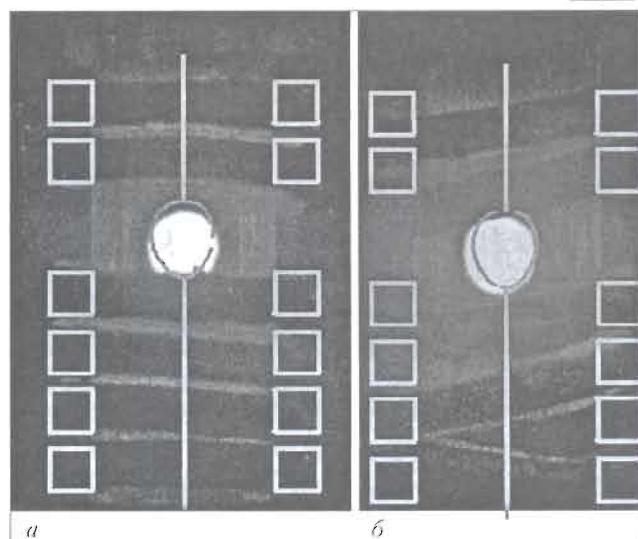


Рис. 5. Сравнение расчетной и экспериментальной равновесной формы взвешенной жидкой капли Ni-Cr в экспериментальной установке, показанной на рис. 1: а — вид спереди; б — вид сбоку; результаты моделирований получены при токе в катушке, равном 1250 А

рассчитанного в работе [12]. В этом контрольном примере рассматривается левитация капли алюминия радиусом 5 мм в условиях невесомости при использовании одного токового контура, расположенного в плоскости экватора. Эффективное значение тока в катушке составляет 200 А при частоте тока в катушке 9,6 кГц. Свойства материала идентичны указанным выше, за исключением вязкости, установленной равной искусственному высокому значению 2,38 кг/м²/с, чтобы рассчитываемый поток оставался ламинарным. Электропроводность жидкого алюминия составляет $3,85 \cdot 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Шаг времени выбирается равным 1 мкс, размер сетки в поверхностном электромагнитном слое составляет 90 мкм. Вначале металл в жидкой капле находится в состоянии покоя.

На рис. 4 показано развитие во времени координаты z в верхней центральной части капли. В начальной переходной фазе капля растягивается в осевом направлении. Затем форма капли стабилизируется и приобретает вид сплющенного эллипсоида при $t = 32$ мс. Наши результаты согласуются с результатами, представленными в работе [12]. Конечная амплитуда деформации капли, предсказанная моделью, очень близка к амплитуде, рассчитанной в работе [12]. Однако следует отметить, что, согласно нашему моделированию, переходной этап оказывается несколько более коротким.

Модель использовали для имитации эксперимента по левитации, описанного ранее. Каплю хромоникелевого сплава помещали в условиях нормальной гравитации в катушке для левитации (рис. 1). Радиус капли составил 3,1 мм. Свойства материала были следующими: $\gamma = 1,75 \text{ Н/м}$, $\rho_1 = 8400 \text{ кг/м}^3$, $\mu_1 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м} \cdot \text{с}$ и $\sigma = 1 \cdot 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Вначале металлическая капля находилась в состоянии покоя. Шаг времени составлял 5 мкс, размер сетки в поверхностном электромагнитном слое равнялся 110 мкм. Важным входным параметром в мо-

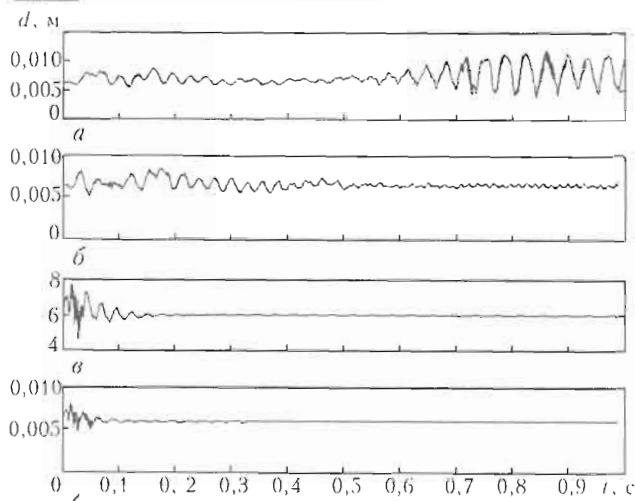


Рис. 6. Расчетные изменения во времени вертикального диаметра d капли при различных значениях тока в катушке, А: $a - 1250$; $b - 2500$; $c - 5000$; $d - 5625$

дели является реальный электрический ток, проходящий в катушке. К сожалению, этот параметр не определяется приборами установки, его невозможно измерить или рассчитать в ходе экспериментов.

На основании серии экспериментов с моделированием установлено, что для левитации капли ток в катушке должен составлять 1250...5625 А. Равновесную форму взвешенной капли, предсказанную моделью (для $I = 1250$ А), сравнивали (рис. 5) с видеоизображениями капли, записанными в ходе эксперимента. В этом случае было выбрано значение тока 1250 А, поскольку оно обеспечивает оптимальное соответствие экспериментальных и расчетных результатов. Расчетную равновесную форму получали путем усреднения различных форм капли, рассчитанных в течение первых 3 с моделирования. Видеоизображения являются результатом усреднения 400 кадров. Хорошее соответствие обнаружено между расчетной формой, фронтальным и поперечным сечениями капли, зафиксированное экспериментально. Модель также хорошо прогнозирует равновесную высоту капли.

Уровень тока оказывает большое влияние на колебания поверхности. Как показано на рис. 6, колебания поверхности капли происходят в двух различных режимах, в зависимости от тока в катушке. При низких значениях тока (1250 и 2500 А) капля продолжает колебаться по диаметру в течение длительного периода времени с различными амплитудами. Амплитуда этих колебаний увеличивается с понижением тока. При высоких значениях тока (5000 и 5625 А) начальные колебания быстро затухают и исчезают после 100...200 мс.

Выводы

- Исследовали переходную деформацию жидкой взвешенной капли из сплава Ni-Cr под воздействием электромагнитных сил.

- Эксперименты, проведенные с использованием скоростной видеосъемки, показали наличие мгновенной асимметричной формы капли и непрерывные колебания ее свободной поверхности, час-

тоту которых определяли с помощью обработки изображений.

3. Установлено, что в исследованном температурном диапазоне (1650 и 1750 °C) температура металла не оказывает существенного влияния на эту частоту.

4. Разработана двумерная переходная модель, описывающая распределение сил левитации внутри капли, перемешивание жидкого металла в капле под действием указанных сил и деформацию свободной поверхности, полностью учитывающая связь между потоком жидкого металла и динамическими характеристиками свободной поверхности.

5. Определено экспериментально, что при регулировании неизвестного значения тока в индукционной катушке модель может достаточно хорошо прогнозировать равновесную форму и положение взвешенной капли Ni-Cr, зафиксированные в нашей экспериментальной установке.

6. В ближайшем будущем будут проведены специальные работы по измерению тока в индукционной катушке с использованием установки, имеющейся в Киеве, для окончательной проверки данной модели.

7. На следующем этапе будут расширены области применения модели с включением явлений теплопереноса и переноса растворенных веществ в жидкой капле с тем, чтобы ее можно было использовать для имитации эксперимента со взвешенной каплей при исследовании взаимодействия газа с жидким металлом.

8. Разработанная модель будет использована в дополнение к экспериментальным данным для установления предельного массопереноса между газом и жидким металлом, а также кинетики переноса.

- Bakhtiyarov S. I., Overfelt R. A. Recent res. dev. mater. Sci. 4:81. — 2003.
- Petitnicoles L., Jardy A., Abitzer D. Rev. metall. — CIT / Sci. genie. mater 95:177. — 1998.
- Szekely J., Schwartz E. // Proc. of the Intern. Symp. on electromagnetic processing of materials. — Nagoya, Japan, 1994. — 9 p.
- Berry S. R., Hyers R. W., Racz L. M., Abedian B. // Intern. J. Thermophys 26:1565. — 2005.
- Bojarevics V., Pericleous K. // ISIJ Intern. 43:890. — 2003.
- Berry S., Hyers R. M., Abedian B., Racz L. M. // Metall mater trans B 31B:171. — 2000.
- FLUENT Documentation (User's Guide, UDF Manual) Version 6.2.16, Fluent, Inc. — Lebanon, New Hampshire, 2005.
- Hirt C. W., Nichols B. D. J. Comput Phys 39:201. — 1981.
- Youngs D. L. Numerical methods for fluid dynamics. — Academic Press, New York, 1982. — 273 p.
- Brackbill J. U., Kothe D. B., Zemach C. // J. Comput Phys 100:335. — 1992.
- Delannoy Y., Pelletier D., Etay J., Faurette Y. // Proc. of PAMIR Conf., Ramatuelle, France, 2002.
- Bojarevics V., Pericleous K. Magnetohydrodyn 37:93. — 2001.

Горн. шк. Политехн. ин-та области Лоран,

Нанси (Франция)

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

Поступила 11.02.2008

научные
и Украины,
заготовок
из них
правлениям:
вой технологии;
и сплавов
ования для

ИНФОРМАЦИЯ



ВСЕУКРАИНСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ»

3–7 сентября 2008 г. в живописном курортном поселке Коблево на базе отдыха Национального университета кораблестроения «Корабел» прошла всеукраинская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Сварка и родственные процессы и технологии». Конференцию проводили по инициативе Совета молодых ученых Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова. Было представлено 83 доклада от 19 научных и учебных организаций Киева, Николаева, Херсона, Львова, Винницы, Харькова, Чернигова, Днепропетровска, Днепродзержинска, Кировограда, Луганска, Краматорска, Мариуполя, Запорожья.

На открытии конференции с приветственным словом выступил проректор Национального университета кораблестроения В. Ф. Квасницкий. Он отметил, что целью конференции является поддержка молодых ученых и специалистов, приобретение ими опыта публичных выступлений, апробация новых научных результатов, повышение профессиональной квалификации и научного уровня.

В течение трех дней заслушали 45 докладов, большинство из которых вызвали научный и практический интерес.

Основными направлениями конференции были следующие:

исследования физико-химических и металлургических процессов при сварке и родственных технологиях; специальные способы сварки и пайки;

напряжения и деформации при сварке и родственных технологиях, долговечность сварных конструкций;

разработка и изготовление оборудования для сварки; технологии сварки и родственных процессов;

математическое моделирование в сварке и родственных технологиях;

механизация, автоматизация и роботизация в области сварки и родственных технологий.

Большое количество докладов представили специалисты ведущих университетов Украины: НТУУ «КПИ», Восточноукраинского национального университета им. В. Даля, Черниговского государственного технического университета, Приазовского государственного техни-



ческого университета, Национального университета кораблестроения и его Херсонского филиала и др. От Института электросварки поступило 12 докладов. Следует отметить работы молодых сотрудников и аспирантов А. А. Полищко «Исследование химической и структурной однородностей модельных многослойных слитков, полученных способами ЭШН РМ из высоколегированной стали 316L», В. С. Синюка «Исследование влияния ловушек на массоперенос водорода в сварных соединениях из конструкционных сталей», Ю. А. Хохловой «Методика определения микромеханических свойств диффузионного соединения γ -Ti-Al», Е. В. Половецкого «Использование промежуточных прослоек различной конфигурации при диффузионной сварке в вакууме сплавов титана со сплавами алюминия», которые вызвали интерес у аудитории. Лучшие доклады конференции будут опубликованы в сборнике научных работ Национального университета кораблестроения.

В заключение хотелось бы отметить, что руководство университета и члены совета молодых ученых приложили все усилия, чтобы конференция прошла на высоком организационном и техническом уровне. Благодаря их стараниям и гостеприимству участники смогли не только заслушать и обсудить интересные доклады, но и насладиться нежным сентябрьским солнцем и теплым морем.

С. Г. Григоренко



НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ

ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ ИНСТИТУТУ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ — 50!

В сентябре 2008 г. исполнилось 50 лет одному из ведущих научных центров Украины — Физико-технологическому институту металлов и сплавов.

Институт был создан в 1958 г. на базе ряда подразделений Института машиноведения и сельскохозяйственной механики АН УССР. Первоначально он назывался Институтом литьяного производства АН УССР, в 1963 г. его переименовали в Институт проблем литья АН УССР, нынешнее название института носит с 1996 г.

В институте в настоящее время работает около 500 сотрудников, в том числе два академика и четыре члена-корреспондента НАН Украины, 26 докторов и свыше 50 кандидатов наук. В структуру института входит 16 научных отделов и ряд вспомогательных подразделений.

Усилия сотрудников института направлены главным образом на решение следующих важных задач: изучение жидкого состояния многокомпонентных сплавов, взаимодействия сплавов с растворимыми и нерасторимыми твердыми, жидкими и газообразными реагентами, усовершенствование существующих и создание новых литьевых сплавов на базе комплексного и экономного легирования, модификации, дисперсного упрочнения, армирования гранулами, вставками, послойной кристаллизации различных по составу сплавов; исследование физико-химических тепломассообменных процессов и их влияния на качественные характеристики литьых материалов при обработке расплавов высокотемпературной плазменной струей, электронным лучом, лазером; изучение влияния интенсивности силового и электромагнитного полей, регулируемого теплового воздействия на гидродинамические, тепломассовые и кристаллизационные процессы при приготовлении, разливке и кристаллизации сплавов; разработка научных основ создания эффективных технологий и высокопроизводительного оборудования для изготовления литьих заготовок, обеспечивающих существенное повышение производительности, снижение расхода материалов и энергоресурсов, улучшение условий труда, снижение вредного воздействия на окружающую среду.

За 50 лет Физико-технологический институт металлов и сплавов прошел славный путь служения науке.

За эти годы разработки его сотрудников отмечены пятью Государственными премиями СССР, тремя Государственными премиями Украины, четырьмя премиями Совета Министров СССР, пятью именными академическими премиями.

От всей души поздравляем коллектив института с юбилеем, желаем процветания, новых творческих успехов и достижений.

Иж-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Редакция журнала «Современная электрометаллургия»



ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Биктагиров Ф. К. Электрошлаковые технологии с нерасходуемым графитированным электродом в процессах выплавки и рафинирования сталей и сплавов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 «Металлургия черных и цветных металлов и специальных сплавов». Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, 2007 г. Дата защиты 6 февраля 2008 г.

Диссертация посвящена развитию известных и разработке новых способов и технологий электрошлаковой выплавки, обработки и рафинирования сталей и сплавов на основе электрошлаковой плавки с нерасходуемым графитированным электродом.

Выявлено влияние состава шлака и металла, а также температурных условий на поведение углерода в системе графитированный электрод–шлак–металл. Установлено, что для ограничения при электрошлаковой обработке науглероживания металла необходимо применять шлак с определенным соотношением в нем концентраций CaO и SiO_2 , а температуру шлакового расплава поддерживать ниже температуры образования карбидов кальция и кремния. Предложен оксидно-фторидный шлак с содержанием 8...15% SiO_2 , минимально взаимодействующий с углеродом электродов, а также способ физико-химического воздействия на поведение углерода путем регулирования содержания в шлаке оксидов железа в пределах 0,2...0,5%.

Разработана методика и экспериментально определена концентрационная и температурная зависимости сульфидной емкости расплавов системы $\text{CaF}_2\text{--CaO}\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$. Определено, что в данной системе по рафинирующей способности предпочтение следует отдавать шлакам с 30...40% фторида кальция. Сульфидная емкость возрастает в интервале температур 1773...1973 К в 1,7...2,0 раза.

Методами математического моделирования определены закономерности теплового взаимодействия между шлаком и металлом и теплофизические особенности формирования слитков в условиях электрошлаковой (ЭШО) и порционной электрошлаковой (ПЭШО) отливки. Разработан научно обоснованный дифференцированный режим электрошлакового обогрева головной части слитков, позволяющий ограничить развитие двухфазной зоны и продолжительность пребывания металла в интервале кристаллизации и тем самым повысить качество слитков.

Создана и запущена в эксплуатацию специализированная установка для получения способом ЭШО кузнецких слитков массой до 8 т. Разработана технология отливки и исследовано качество слитков ЭШО из различных сталей, в том числе 9Х2МФА, 35ХН3МФА, 5ХНМ. Определено, что по всем показателям слитки ЭШО превосходят аналогичные слитки традиционного производства, что положительно сказывается на служебных свойствах изготавляемых из них изделий, в частности валков холодной прокатки, стойкость которых увеличивается в 1,4 раза.

Исследовано качество металла крупных (до 75 т) слитков ПЭШО в литом и деформированном состоянии. Показано, что данный способ является одним из наиболее эффективных для изготовления высококачественных крупных (массой десятки тонн) стальных слитков, предназначенных для производства ответственных изделий с улучшенными служебными характеристиками.

Разработана технология электрошлаковой выплавки и рафинирования (ЭШВР) из некомпактной шихты марганцевомедных сплавов высокого демпфирования. Установлено, что полученные слитки имеют хорошее качество, а демпфирующие свойства сплава находятся на уровне лучших образцов для подобного металла, в том числе при использовании металлургического марганца вместо электролитического. Показана перспективность применения технологии ЭШВР для производства высококачественных марганцевомедных сплавов, идущих на изготовление различных вибропоглощающих устройств.

Выполнен анализ и определена возможность применения электрошлаковой плавки для получения из неметаллических отходов и минерального сырья ферросплавов и лигатур. Разработана и реализована технология выплавки из конверторного ванадиевого шлака ванадийсодержащих лигатур со степенью извлечения ванадия 92...95% и высокими технико-экономическими показателями.





ИННОВАЦИОННАЯ ФИРМА «ЭЛТЕРМ»

Инновационная фирма «Элтерм», организованная в 1992 г., используя научные разработки Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, накопила богатый практический опыт в изготовлении заготовок способами специальной электрометаллургии и получении из них готовых изделий (см. вклейку).

Фирма ведет деятельность по таким трем основным направлениям:

- ❖ инжиниринг в области машиностроения, электрошлаковой технологии (ЭШТ), специальных видов литья и металловедения;
- ❖ изготовление высококачественных заготовок из сталей и сплавов способами ЭШТ;
- ❖ организация производства высокотехнологичного оборудования для добычи нефти и газа с больших глубин.

Инжиниринг. Располагая высококвалифицированными специалистами, фирма предоставляет инженерно-консультативные услуги по подготовке и обеспечению производственных процессов, в т. ч. следующие:

научные исследования в области машиностроения и специальной электрометаллургии;

разработка технологических процессов изготовления высококачественных заготовок и деталей из них;

проектирование производственных участков, выбор технологического оборудования и планировка его размещения;

разработка технической документации, изготовление технологического оборудования и оснастки;

техническое сопровождение при изготовлении и вводе в эксплуатацию оборудования, а также при отработке технологии серийного производства заготовок;

проведение экспертных исследований по оценке качества изделий.

Изготовление заготовок методами ЭШТ. ИФ «Элтерм» разработала и внедрила в производство технологические процессы изготовления различных заготовок:

электрошлаковое литье (ЭШЛ) фасонных заготовок в неподвижных разборных кристаллизаторах, в том числе с приплавлением заранее изготовленных элементов;

ЭШЛ сплошных и полых заготовок постоянного поперечного сечения в подвижных кристаллизаторах;

центробежное электрошлаковое литье кольцевых заготовок, в том числе из металлических отходов и отработанных деталей.

Электрошлаковый металл характеризуется высоким уровнем чистоты и плотности. По сравнению с кованым металлом, он имеет повышенные значения пластичности, вязкости и сопротивления хрупкому разрушению. Это позволяет при изготовлении ответственных деталей использовать фасонные электрошлаковые отливки вместо поковок.

Электрошлаковые фасонные отливки используются для изготовления крупных корпусов запорной арматуры трубопроводов атомных электростанций, корпусов задвижек и других элементов фонтанной арматуры высокого давления для нефтяных и газовых скважин, фланцев из высоколегированных сталей для химической аппаратуры и многих других ответственных деталей машиностроения.

Разработаны оборудование и оснастка для получения фасонных отливок всеми указанными способами и освоено их промышленное производство. Накоплен значительный производственный опыт изготовления перечисленными способами различных отливок массой от 100 до 2000 кг из сталей с категорией прочности КП50 - КП110.

Организация производства высокотехнологичного оборудования для добычи нефти и газа. Благодаря использованию высококачественных литых электрошлаковых заготовок корпусов задвижек с фланцами фирма освоила серийный выпуск прямоточных задвижек с условным проходом Ду50, Ду65 и Ду80 на давление 70 МПа.

При изготовлении запорных узлов задвижек используются детали с коррозионно-износостойким покрытием, полученным способом плазменно-порошковой наплавки.

На базе этих задвижек создано производство фонтанной арматуры разной модификации для добычи нефти и газа с больших глубин. Освоено также производство манифольдов, используемых при бурении глубоких скважин.

Высокое качество оборудования, производимого ИФ «Элтерм», подтверждается его безотказной эксплуатацией в течение более десяти лет на газоконденсатных месторождениях Украины.

ИФ «Элтерм» приглашает к сотрудничеству все заинтересованные организации.

*Наши реквизиты: ООО Инновационная фирма «Элтерм»,
технопарк «Институт электросварки им. Е. О. Патона».*

Адрес: г. Киев, ул. Горького, 56, корп. 2, комн. 510.

Почтовый адрес: а/я 133, п/о 03150, г. Киев, Украина.

Тел./факс: 289 86 73, e-mail: elterm@i.kiev.ua.



УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В 2008 г.

Автор и название статьи	№ журнала	Автор и название статьи	№ журнала
<i>К 75-летию ОАО "Украинский графит"</i> Развитие научно-производственной базы при изготовлении электродной продукции на ОАО "Украинский графит"	3	Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Жук Г. В., Березос В. А., Ерохин А. Г. Перспективы производства титановых труб для нефтегазовой промышленности способом ЭЛПЕ	4
<i>К 90-летию со дня рождения</i> Борис Евгеньевич Патон ЭШП – 50 лет!	2	Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Жук Г. В., Березос В. А. Развитие электронно-лучевой плавки титана в ИЭС им. Е. О. Патона	3
ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ		Савенко В. А., Гречанюк Н. И., Чураков О. В. Электронно-лучевое рафинирование в производстве платины и сплавов на ее основе. Сообщение 1. Электронно-лучевое рафинирование платины	1
Жадкевич М. Л., Шевцов В. Л., Пузрин Л. Г. Электрошлаковое литье полых слитков и заготовок в промышленном производстве (Обзор)	3	Савенко В. А., Гречанюк Н. И., Чураков О. В. Электронно-лучевое рафинирование платины и сплавов на ее основе. Сообщение 2. Электронно-лучевое рафинирование сплавов на основе платины	3
Махненко В. И., Медовар Л. Б., Саенко В. Я., Королева Т. В., Полищко А. А. Математическое моделирование процессов укрупнения слитков из высоколегированных сталей и сплавов способом электрошлаковой наплавки жидким металлом в токоподводящем кристаллизаторе	4	Северин А. Ю., Жук Г. В., Тригуб Н. П., Замков В. Н., Топольский П. Ф., Петриченко И. К. Разработка и получение титанового сплава с повышенными жаропрочными характеристиками	4
Митчелл А. Кристаллизация металла в процессах переплава	2	Северин А. Ю., Тригуб Н. П., Жук Г. В. Электронно-лучевая плавка с промежуточной емкостью жаропрочных титановых сплавов, упрочненных силицидами	1
Митчелл А. Электрошлаковая технология для производства аэрокосмических сплавов	4	Тригуб Н. П., Жук Г. В. Разработка прогрессивных технологических схем производства титановой продукции в ИЭС им. Е. О. Патона	4
Протоколов И. В. Электрошлаковая выплавка галогенидных бескислородных флюсов	2	Тугай Б. А. Автоматическое управление током газоразрядной электронной пушки с холодным катодом	3
Скрипник С. В., Чернега Д. Ф., Горячек А. В. Исследование качества конусных заготовок из стали 20Х13, полученных способом центробежного электрошлакового литья	3	Устинов А. И., Ляпина К. В., Мельниченко Т. В., Некрасов А. А. Влияние температуры подложки на формирование пористой структуры нержавеющей стали при ее совместном осаждении с парами NaCl и KCl	1
Цыбуленко К. А. Физическое моделирование гидродинамики шлаковой ванны в слабовом токоподводящем кристаллизаторе. Часть 1. Выплавка слитка	1	Устинов А. И., Олиховская Л. А., Мельниченко Т. В., Шишгин А. Е., Матвиенко Я. И. Твердофазные реакции при нагреве многослойных фольг Al/Ti, полученных методом электронно-лучевого осаждения	2
Цыбуленко К. А., Вислобоков О. М. Физическое моделирование гидродинамики шлаковой ванны в слабовом токоподводящем кристаллизаторе. Часть 2. Наплавка	3	Яковчук К. Ю., Дидикин Г. Г., Романенко С. М., Литвин С. Е., Скрыбинский В. В., Маринский А. Г. Конденсационные эрозионно-стойкие покрытия на основе карбida бора	3
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ		ПЛАЗМЕННО-ДУГОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ	
Гречанюк В. Г., Денисенко В. А. Структура и коррозионная стойкость композиционных материалов на основе меди и молибдена, полученных способом электронно-лучевой технологии	4	Бурнашев В. Р. Плазменно-дуговой переплав отходов tantala	4
Жук Г. В. Моделирование процессов переноса тепла при формировании слитков ЭЛПЕ	4	Ждановский А. А., Шаповалов В. А., Мельник Г. А., Жирон Д. М., Приходько М. С., Одинцова Л. Г. Исследование плазменно-шлаковых процессов специальной и комбинированной электрометаллургии стали	1
Жук Г. В. О влиянии распределения мощности нагрева металла в кристаллизаторе в процессе ЭЛПЕ на структуру титановых слитков	2	Жадкевич М. Л., Шаповалов В. А., Мельник Г. А., Торхов Г. Ф., Жирон Д. М., Вислобоков О. М., Приходько М. С., Ревякин Е. Ю., Пешков А. Н. Исследование электрической дуги в условиях ее взаимодействия с воздушно-пылеугольной смесью	2
Жук Г. В., Тригуб Н. П., Фесан А. А. Энергетические характеристики процесса ЭЛПЕ титановых сплавов	4		
Ладохин С. В., Вахрушева В. С. Перспективы применения электронно-лучевой плавки для получения сплавов циркония в Украине	4		
Могильникова Т. Т., Нероденко Л. М., Мовчан Б. А. Взаимосвязь структуры, микроскопического предела упругости и внутреннего трения композиционных материалов, полученных способами электронно-лучевой технологии	2		



Автор и название статьи	№ журнала	Автор и название статьи	№ журнала
Кожемякин Г. Н., Лутовой Н. Н., Шаповалов В. А., Никитенко Ю. А., Иванов О. Н., Колесников Д. А. Изменение структуры при отжиге быстрозакаленного сплава плазменно-дуговой выплавки	4	Костяков В. Н., Полетаев Е. Б., Григоренко Г. М., Филозоф В. Н., Шевчук Е. А. Влияние технологических факторов на экономические показатели жидкотвердого восстановления	2
Шаповалов В. А., Никитенко Ю. А., Мельник А. С. Тепловое состояние барабана-холодильника плазменно-дуговой установки в процессе сверхбыстрой закалки расплава	3	ЭНЕРГOREСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	
ВАКУУМНО-ИНДУКЦИОННАЯ ПЛАВКА		РЕЦЕНЗИИ И НАУЧНЫЕ ДИСКУССИИ	
Шейко И. В., Шаповалов В. А., Якуша В. В. Индукционная плавка в секционном кристаллизаторе, ее возможности и перспективы применения для получения литых изделий	2	Лакомский В. И., Ахонин С. В. Рецензия на монографию Г. А. Колобова, В. И. Пожуева, В. В. Тэлина «Титан вторичный»	2
ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТАЛЛУРГИИ		ИНФОРМАЦИЯ	
Григоренко Г. М., Помарин Ю. М., Орловский В. Ю., Лакомский В. В., Калишок Н. Н., Алексеенко И. И. О растворении твердых частиц TiN в жидким титане во время плавки	2	А. Г. Пономаренко — 80	1
Куренкова В. В., Оноприенко Е. В., Малащенко И. С., Белявина А. Ф., Червякова Л. В. Структура и прочностные свойства паяных соединений литьевого никелевого сплава ЖС26НК. Часть 2	1	Ахонин С. В. Международная конференция "Ti-2008 в СНГ"	3
Помарин Ю. М., Хижняк В. Г., Дегула А. И., Смиян О. Д. Диффузионные комплексные покрытия с добавкой титана на твердых сплавах ВК8 и Т15К6	2	Балицкий А. И. Международная конференция по высокоизотищным сталим HNS-2006	1
Постиженко В. К. Анализ технологического развития конечной обработки металлоизделий	1	В. И. Степанюк — 60	1
Рабинович А. В., Бублик Ю. А., Трегубенко Г. Н., Поляков Г. А., Пучиков А. В., Дементьев Ж. А. Улучшение структуры и повышение свойств литых феррито-перлитных сталей для транспортного машиностроения	1	В. Я. Саенко — 70	2
Шапель П., Жарди А., Аблизер Д., Помарин Ю. М., Григоренко Г. М. Деформации свободной поверхности металлической капли в эксперименте по электромагнитной левитации	1	Григоренко С. Г. Всеукраинская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Сварка и родственные процессы и технологии»	4
ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ СТАЛИ И ФЕРРОСПЛАВОВ		Диссертация на соискание ученой степени	4
Костяков В. Н., Полетаев Е. Б., Григоренко Г. М., Медведь С. Н., Шевчук Е. А., Ясинский А. А., Яковышин О. А. Теплообмен в жидкой ванне при плавке рудно-угольных окатышей	1	Журналу «Автоматическая сварка» — 60	1
Панченко А. И., Логозинский И. Н., Сальников А. С., Мазурук С. Л., Касьян С. С., Казаков С. С., Скрипка Л. М., Гасик М. И., Горобец А. П., Сезоненко О. Н. Разработка и освоение технологии раскисления и легирования подшипниковской стали ШХ15СГ-В ферросиликомарганцем MnC25	3	Инновационная фирма "Элтерм"	4
Троянский А. А., Синяков Р. В. Идентификация технологических событий при выплавке стали в дуговой сталеплавильной печи с использованием вейвлет-анализа	3	К 80-летию Бориса Алексеевича Мовчана	1
		Календарь конференций и выставок в 2008 г.	1
		Липодава В. Н. Выставка "Сварка. Родственные технологии — 2008"	3
		Новые книги	2
		Н. Т. Шевченко — 70	3
		О. А. Троянскому — 60	3
		Памяти академика В. К. Лебедева	3
		Памяти Арсенюка Валерия Васильевича	3
		Памяти Ю. М. Помарина	1
		Правила оформления рукописей для журнала «Современная электрометаллургия»	1
		Ройзман В. П. Международная научно-техническая конференция в Египте	2
		Смиян О. Д. IX Международная конференция-выставка «Проблемы коррозии и противокоррозионная защита конструкционных материалов» — «Коррозия-2008»	3
		Физико-технологическому институту металлов и сплавов — 50!	4
		Царюк А. К. Украинско-российский семинар по атомной энергетике	2



УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

Аблизер Д., №4
Алексеенко И. И., №2
Ахонин С. В., №2, 3
Балицкий А. И., №1
Березос В. А., №3, 4
Белягин А. Ф., №1
Бубликов Ю. А., №1
Буриашев В. Р., №4
Вахрушева В. С., №4
Вислобоков О. М., №2
Гасик М. И., №3
Горячек А. В., №3
Горобец А. П., №3
Гречаник В. Г., №4
Гречаник Н. И., №1, 3
Григоренко Г. М., №1,
2(2), 4
Григоренко С. Г., №4
Дегула А. И., №2
Дементьева Ж. А., №1
Денисенко В. А., №4
Дидикин Г. Г., №3
Ерохин А. Г., №4
Жадкевич М. Л., №2, 3
Жарди А., №4
Ждановский А. А., №1
Жиров Д. М., №1, 2
Жук Г. В., №1, 2, 3, 4(5)
Замков В. Н., №3

Иванов О. Н., № 4
Казаков С. С., №3
Калинюк Н. Н., №2
Каасян С. С., №3
Кожемякин Г. Н., №4
Королева Т. В., №4
Костяков В. Н., №1, 2
Куренкова В. В., №1
Ладохин С. В., №4
Лакомский В. В., №2
Лакомский В. И., №2
Липодав В. Н., №3
Литвин С. Е., №3
Логозинский И. Н., №3
Луговой Н. Н., №4
Ляпина К. В., №1
Мазурук С. Л., №3
Малашенко И. С., №1
Маринский А. Г., №3
Матвиешко Я. И., №2
Махненко В. И., №4
Медведь С. Н., №1
Медовар Л. Б., №4
Мельник Г. А., №1, 2
Мельник А. С., №3
Мельниченко Т. В., №1, 2
Митчелл А., №2, 4
Мовчан Б. А., №2
Могильникова Т. Т., №2
Некрасов А. А., №1

Нероденко Л. М., №2
Никитенко Ю. А., №3, 4
Одинцова Л. Г., №1
Олиховская Л. А., №2
Оноприенко Е. В., №1
Орловский В. Ю., №2
Патон Б. Е., №3, 4
Петриченко И. К., №4
Пешков А. Н., №2
Помарин Ю. М., №2(2), 4
Полетаев Е. Б., №1, 2
Полищко А. А., №4
Поляков Г. А., №1
Постиженко В. К., №1
Приходько М. С., №1, 2
Протоковилов И. В., №2
Пузрин Л. Г., №3
Пучиков А. В., №1
Рабинович А. В., №1
Ревякин Е. Ю., №2
Ройzman В. П., №2
Романенко С. М., №2
Савенко В. А., №1, 3
Саенко В. Я., №4
Сальников А. С., №3
Северин А. Ю., №1, 4
Сезоненко О. Н., №3
Синяков Р. В., №3
Скрипка Л. М., №3
Скрипник С. В., №3

Скрябинский В. В., №3
Смиян О. Д., №2, 3
Торхов Г. Ф., №2
Топольский П. Ф., №4
Трегубенко Г. Н., №1
Тригуб Н. П., №1, 3, 4(4)
Троянский А. А., №3
Тугай Б. А., №3
Устинов А. И., №1, 2
Фесан А. А., №4
Филозоф Ф. Н., №2
Хижняк В. Г., №2
Царюк А. К., №2
Цыкуленко К. А., №1, 3
Червякова Л. В., №1
Чернега Д. Ф., №3
Чураков О. В., №1, 3
Шаповалов В. А., №1, 2(2),
3, 4
Шапель П., №4
Шевцов В. Л., №3
Шевчук Е. А., №1, 2
Шейко И. В., №2
Шишkin A. E., №2
Яковчук К. Ю., №3
Яковышин О. А., №1
Якуша В. В., №2
Ясинский А. А., №1