

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. Петрунко,
А. С. Письменный, Н. П. Тригуб,
А. А. Троянский, А. И. Устинов,
В. А. Шаповалов

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Д. Аблизер (Франция)
Г. М. Григоренко (Украина)
А. А. Ильин (Россия)
Б. Короушич (Словения)
С. Ф. Медина (Испания)
А. Митчелл (Канада)
Б. Е. Патон (Украина)
Ц. В. Рашев (Болгария)
Ж. Фокт (Франция)
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) 200 82 77;
200 54 84
Тел.: (38044) 205 22 07
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Редактор:

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

Свидетельство
о государственной регистрации
КВ 6185 от 31.05.2002

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Протокилов И. В. Измельчение кристаллической структуры полых титановых слитков при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке..... 3

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Березос В. А., Тригуб Н. П. Получение сплавов с эффектом памяти формы на основе титана способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью 6

Мушегян В. О. Оптимизация технологии электронно-лучевой плавки молибдена методом математического моделирования 9

Аснис Е. А., Пискун Н. В., Статкевич И. И. Очистка кремния от фоновых и легирующих примесей при электронно-лучевой бестигельной зонной плавке..... 12

ВАКУУМНО-ИНДУКЦИОННАЯ ПЛАВКА

Шейко И. В., Шаповалов В. А., Якуша В. В., Никитенко Ю. А., Жиров Д. М. Охлаждаемые кристаллизаторы для формирования слитков с электромагнитным воздействием на расплав 14

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТАЛЛУРГИИ

Ахонин С. В., Кругленко М. П., Петриченко И. К., Вржижевский Э. Л., Мищенко Р. Н., Селин Р. В. Влияние термического цикла сварки на структурные превращения в сплавах системы Ti-Si-X 20

Пискун Н. В., Богайчук И. Л., Аснис Е. А., Григоренко Г. М., Статкевич И. И., Лакомский В. В., Костин В. А., Козин Р. В., Березос В. А. Особенности структуры интерметаллидного сплава после зонной перекристаллизации 28

Протокилов И. В. МГД технологии в металлургии (Обзор) 32

ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Шаповалов В. А., Биктагиров Ф. К., Бунашев В. Р., Колесниченко В. И., Степаненко В. В., Рейда Н. В., Карускевич О. В., Ботвинко Д. В. Электротермическое компактирование металлических материалов 42

Шаповалов В. А., Бунашев В. Р., Биктагиров Ф. К., Игнатов А. П., Мьяница Г. Ф., Степаненко В. В., Брагин М. А., Пудиков В. Н., Подъячев Д. В., Ботвинко Д. В., Жиров Д. М., Гнатушенко А. В. ЭШП электродов, спрессованных из стружки аустенитных нержавеющей сталей 46

ИНФОРМАЦИЯ

Сфанов В. С. На шляху до інноваційних лікарських препаратів 49

Дмитрик В. В. 3-я Международная конференция «High Mat Tech» 51

К 85-летию со дня рождения В. И. Лакомского 52

В. И. Махненко — 80 53

В. Н. Липодаеву — 70 54

Б. Б. Федоровскому — 70 54

Указ президента України № 845/2011 про відзначення державною нагородою Сергія Івановича Кучука-Яценка 55

Памяти Леонида Густавовича Пузрина 56

Памяти Евгения Христофоровича Шахпазова 57

К 100-летию со дня рождения М. К. Янгеля (1911–1971 гг.) 58

Указатель статей, опубликованных в 2011 г. 59

Указатель авторов 61

**SOVREMENNAYA
ELEKTROMETALLURGIYA**
(Electrometallurgy Today)

№ 4 (105)
2011

Published since January, 1985

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

Publisher: International Association «Welding»

Is published 4 times a year

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief

B. E. Paton

M. I. Gasik,

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

**THE INTERNATIONAL
EDITORIAL COUNCIL:**

D. Ablitzer (France)
G. M. Grigorenko (Ukraine)
A. A. Iljin (Russia)
B. Koroushich (Slovenia)
S. F. Medina (Spain)
A. Mitchell (Canada)
B. E. Paton (Ukraine)
Ts. V. Rashev (Bulgaria)
J. Foct (France)
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) 200 82 77;
200 54 84
Tel.: (38044) 205 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

State Registration Certificate
KV 6185 of 31.05.2002

All rights reserved.

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

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

CONTENTS

ELECTROSLAG TECHNOLOGY

Protokovilov I. V. About feasibility of refining crystalline structure of hollow ingots of titanium alloys in magnetically-controlled electroslag melting.....3

ELECTRON BEAM PROCESSES

Berezos V. A., Trigub N. P. Producing of shape memory alloys on titanium base using EBCHM method.....6

Mushegyan V. O. Optimizing the technology of electron beam melting of molybdenum using method of mathematical modeling.....9

Asnis E. A., Piskun N. V., Statkevich I. I. Refining of silicon from background and alloying impurities in electron beam crucibleless zonal melting.....12

VACUUM-INDUCTION MELTING

Sheiko I. V., Shapovalov V. A., Yakusha V. V., Mikitenko Yu. A., Zhirov D. M. Cooled moulds for ingots formation with electromagnetic effect on melt.....14

GENERAL PROBLEMS OF METALLURGY

Akhonin S. V., Kruglenko M. P., Petrichenko I. K., Vrzhezhevsky E. L., Mishchenko R. N., Selin R. V. Structural transformations in alloys of Ti-Si-X systems during thermal cycle of welding.....20

Piskun N. V., Bogaychuk I. L., Asnis E. A., Grigorenko G. M., Statkevich I. I., Lakomsky V. V., Kostin V. A., Kozin R. V., Berezos V. A. Peculiarities of structure of intermetallic alloy after zonal recrystallization.....28

Protokovilov I. V. MHD technologies in metallurgy (Review).....32

ENERGY AND RESOURCES SAVING

Shapovalov V. A., Biktagiroy F. K., Burnashev V. R., Kolesnichenko V. I., Stepanenko V. V., Reida N. V., Karuskevich O. V., Botvinko D. V. Electrothermal compacting of metallic materials.....42

Shapovalov V. A., Burnashev V. R., Biktagiroy F. K., Ignatov A. P., Myalitsa G. F., Stepanenko V. V., Bragin M. A., Pudikov V. N., Podjachev D. V., Botvinko D. V., Zhirov D. M., Gnatushenko A. V. ESR of electrodes compacted of austenite stainless steel chips.....46

INFORMATION

Efanov V. S. On the way to innovation medicine.....49

Dmitrik V. V. III International Conference «High Mat Tech».....51

Towards the 85th birthday of V. I. Lakomsky.....52

V. I. Makhnenko is 80.....53

V. N. Lipodaev is 70.....54

B. B. Fedorovsky is 70.....54

Decree №845/2011 of President of Ukraine about decoration of Kuchuk-Yatsenko S. I. with State Award.....55

In memory of Puzrin Leonid Gustavovich.....56

In memory of Shakhpazov Evgeny Christoforovich.....57

Towards the 100th birthday of Yangel M. K. (1911–1971).....58

Index of articles, published in 2011.....59

Index of authors.....61

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



УДК 669.187.56.001.3

ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛЫХ ТИТАНОВЫХ СЛИТКОВ ПРИ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМОЙ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ ПЛАВКЕ*

И. В. Протокилов

Исследованы особенности формирования кристаллической структуры полых слитков при ЭШП под воздействием внешнего магнитного поля. Показана возможность измельчения структуры слитка за счет гидродинамического воздействия на жидкометаллическую ванну, создаваемого внешним продольным магнитным полем.

Peculiarities of formation of crystalline structure of hollow ingots in ESR under the effect of external magnetic field were investigated. The feasibility of refining the ingot structure due to hydrodynamic effect, generated by external magnetic field, on molten metal pool is shown.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав; магнитное поле; титан; полый слиток; макроструктура

В работах [1–3] показана возможность измельчения кристаллической структуры и повышения химической и физической однородности слитков титановых сплавов в процессе магнитоуправляемой электрошлаковой плавки (МЭП). Указанные эффекты достигались в результате гидродинамического воздействия на жидкометаллическую ванну, создаваемого током плавки и внешним магнитным полем.

Цель данной работы заключалась в исследовании возможности измельчения в процессе МЭП кристаллической структуры полых титановых слитков, используемых в качестве заготовок для производства бесшовных холодно- и горячекатаных труб. Грубая крупнозернистая структура заготовок, свойственная литому металлу, значительно усложняет или делает невозможной их дальнейшую деформацию. Поэтому структурный фактор, наряду с технико-экономическими показателями, является важнейшей характеристикой, определяющей эффективность производства полых трубных заготовок металлургическими способами.

Опытные плавки выполняли в камерной электрошлаковой печи в аргоне (рис. 1). Расходуемый электрод, сформированный из шести титановых прутков диаметром 35 мм (рис. 2), переплавляли в кристаллизаторе диаметром 160 мм под флюсом АН-Т4. Диаметр внутреннего конического кристаллизатора составлял 40... 50 мм.

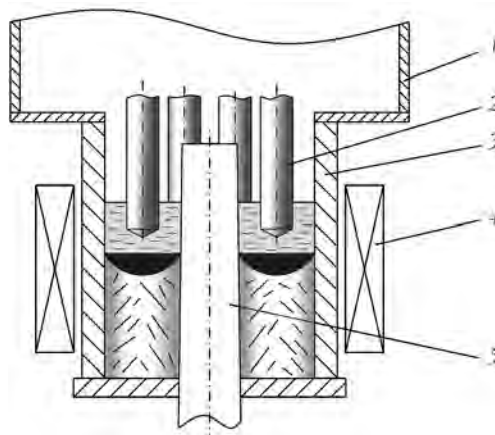


Рис. 1. Схема МЭП полых слитков: 1 — камера печи; 2 — расходуемый электрод; 3 — внешний кристаллизатор; 4 — электромагнитная система; 5 — внутренний кристаллизатор

*В работе принимали участие инженеры Д. А. Петров и А. М. Белов.



Рис. 2. Внешний вид расходоуемого электрода после плавки

Режимы выплавки полых слитков						
Диаметр полого слитка, мм		U, В	I, А	Параметры электромагнитного воздействия		
наружный	внутренний			B, Тл	t _{имп} , с	t _п , с
160	40...50	36	4500	—	—	—
160	40...50	36	5000 (1200)	0,20...0,28	1	10

Примечание. В скобках указано минимальное значение тока во время импульса магнитного поля; t_{имп} — продолжительность импульса электромагнитного воздействия; t_п — продолжительность паузы между импульсами электромагнитного воздействия.

Плавки осуществляли как без, так и с электромагнитным воздействием аксиальным (продольным) магнитным полем, созданным соленоидом, охватывающим кристаллизатор. Электромагнитное воздействие производили отдельными импульсами постоянного магнитного поля, чередующимися с паузами. Режимы плавки приведены в таблице.

Механизм гидродинамического воздействия при выплавке полых слитков состоит во взаимодействии аксиальной составляющей внешнего магнитного поля B_z с радиальной составляющей тока плавки I_r в металлургической ванне. В результате такого взаимодействия в токонесущем расплаве формируется

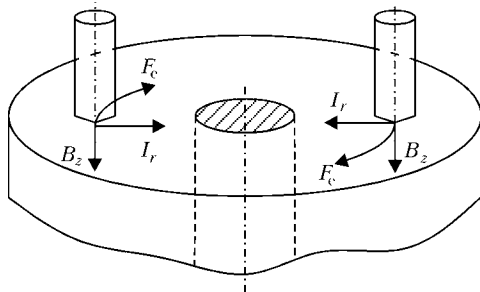
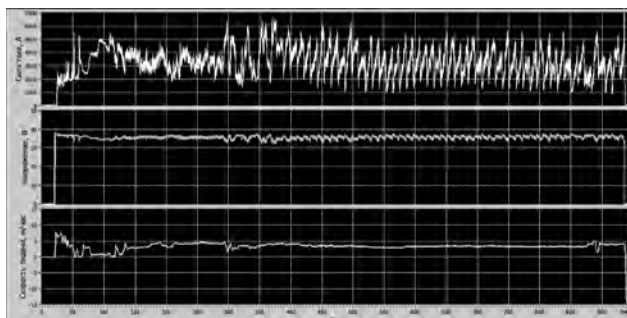
Рис. 3. Направление электромагнитной силы при МЭП полых слитков: B_z — осевая составляющая индукции внешнего магнитного поля; I_r — радиальная составляющая тока плавки; F_c — электромагнитная сила

Рис. 4. Регистрограмма режимов плавки при импульсном электромагнитном воздействии

азимутальная электромагнитная сила $F_e = I_r \times B_z$, приводящая к вращению и вибрации ванны вокруг оси симметрии (рис. 3). При этом эффективность электромагнитного воздействия при выплавке полых слитков увеличивается за счет использования внутреннего токоведущего кристаллизатора, в результате чего увеличивается радиальная составляющая тока в металлургической ванне I_r , а соответственно, и уровень электромагнитной силы F_e .

Эксперименты с импульсным воздействием продольного магнитного поля при выплавке полых слитков показали, как и при МЭП цельных слитков титановых сплавов [1], наличие закономерного явления, когда импульсное воздействие магнитного поля вызывает периодическое изменение тока плавки (рис. 4). Во время импульса магнитного поля ток плавки снижается, а во время паузы — восстанавливается до исходного значения. Такое снижение тока во время импульса магнитного поля вызвано прежде всего деформацией свободной поверхности шлаковой ванны под действием вращения шлака и снижением глубины погружения расходоуемых электродов в шлак. В этом случае при магнитной индукции в зоне плавки до 0,28 Тл процесс



Рис. 5. Полый слиток сплава ВТ1



Рис. 6. Макроструктура полых титановых слитков, выполненных без (а) и с электромагнитным воздействием (б)

носил квазистационарный характер и не приводил к заметному ухудшению стабильности электрошлакового переплава и качества формирования слитка. Грубых дефектов на внутренней и наружной поверхностях слитков не выявлено (рис. 5).

Макроструктура слитков, выплавленных без и с электромагнитным воздействием, приведена на рис. 6. В обоих случаях структура металла плотная, без пор, шлаковых включений и прочих дефектов. Слитки, полученные без внешнего воздействия, характеризуются наличием крупных столбчатых кристаллов, ориентированных преимущественно параллельно оси слитка (рис. 6, а). Продольный размер кристаллов составляет 20... 50 мм, поперечный — 3... 7 мм.

При электромагнитном воздействии структура металла более однородная и мелкозернистая, состоящая из вытянутых в направлении теплоотвода кристаллов со средним размером 2×10 мм и равноосных кристаллов размером 2... 4 мм (рис. 6, б).

Механизм измельчения структуры заключается в разрушающем действии на растущие кристаллы электромагнитной вибрации частотой 50 Гц, вызванной взаимодействием постоянного магнитного поля с переменным током плавки, а также гидродинамическими «ударами», происходящими в момент включения и выключения магнитного поля.

Следует отметить, что импульсное воздействие магнитным полем вызывает циклические изменения

тока плавки и, соответственно, порционное тепловыделение в шлаковой ванне. В результате к гидродинамическим механизмам измельчения структуры металла добавляются механизмы теплового воздействия на его кристаллизацию.

Таким образом, показана возможность измельчения кристаллической структуры полых титановых слитков при МЭП путем импульсного электромагнитного воздействия на расплавы шлаковой и металлической ванн продольным магнитным полем. Гомогенизация и измельчение структуры металла трубной заготовки позволят повысить стабильность процесса ее термомеханической обработки и качество изготовленной продукции.

1. Компан Я. Ю., Назарчук А. Т., Протоковилів І. В. К вопросу интенсификации электромагнитного воздействия при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке титановых сплавов // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 4. — С. 3–7.
2. Протоковилів І. В. Магнітокерування електрошлакової плавки багатоконцентних титанових сплавів: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / НАН України; Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона. — Київ, 2006. — 22 с.
3. Компан Я. Ю., Протоковилів І. В. Некоторые технологические аспекты магнитоуправляемой электрошлаковой плавки (МЭП) титановых сплавов // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра» (Київ, 8-9 октября 2002 г.) — Киев, 2002. — С. 256–262.

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

Поступила 22.09.2011



УДК 669.187.826

ПОЛУЧЕНИЕ СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ ТИТАНА СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЕМКОСТЬЮ

В. А. Березос, Н. П. Тригуб

Представлены результаты экспериментальных исследований по получению сплава на основе титана TiNi способом электронно-лучевой плавки.

Results of experimental investigations on producing alloy on TiNi alloy base using electron beam melting are presented.

Ключевые слова: сплав TiNi; электронно-лучевая плавка; слиток

В последнее десятилетие широко применяются сплавы с эффектом памяти формы, которые дают возможность реализовать служебные характеристики конструкций и устройств, недостижимые при использовании других материалов. Они имеют широкий диапазон применения в зависимости от температуры мартенситного превращения и механических свойств. Их используют в ядерной энергетике, машиностроении, авиакосмической и бытовой технике, приборостроении, спецмашиностроении и др. [1–6]. Как показывает накопленный мировой опыт, особенно перспективной областью применения сплавов с памятью формы является медицинская техника [7].

В настоящее время существует более десятка сплавов с эффектом памяти формы на базе разных элементов — TiNi, TiNb, PtTi и др. [8]. Однако самым известным и практически значимым является сплав TiNi — нитинол — с четко выраженным эффектом памяти формы, диапазон температур которого можно регулировать с хорошей точностью путем введения в сплав различных примесей. Применение нитинола обусловлено редким для сплавов такого типа сочетанием высоких конструкционных, технологических и функциональных свойств памяти формы и сверхпластичности. Они имеют хорошие эластичные свойства, способны изменять фор-

му при варьировании температуры и не разрушаться в условиях знакопеременной нагрузки. Сплав характеризуется хорошими характеристиками формозапоминания, имеет большую прочность при более низком модуле упругости, чем у нержавеющей стали, а также отличается высокими уровнями демпфирующей способности материала и коррозионной стойкости.

Проведенные исследования показали, что эти сплавы не токсичны, не оказывают канцерогенного действия на окружающие ткани, имеют высокие показатели коррозионной стойкости в тканях живого организма и биологической совместимости, благодаря чему применяются в медицине в качестве имплантируемых в организм длительно функционирующих материалов [7].

Однако использование любого конструкционного материала зависит не только от его физико-механических свойств, но и от таких характеристик, как технологичность, дефицитность и стоимость. Сложность металлургического производства сплавов TiNi также является сдерживающим фактором для их широкого распространения. Для получения полуфабрикатов с гарантированными температурами срабатывания требуется применение дорогостоящего оборудования. А это приводит к высокой стоимости изделий.

Традиционно для получения сплавов TiNi является обязательным применение многоступенчатого



Рис. 1. Электронно-лучевая установка УЭ-208М

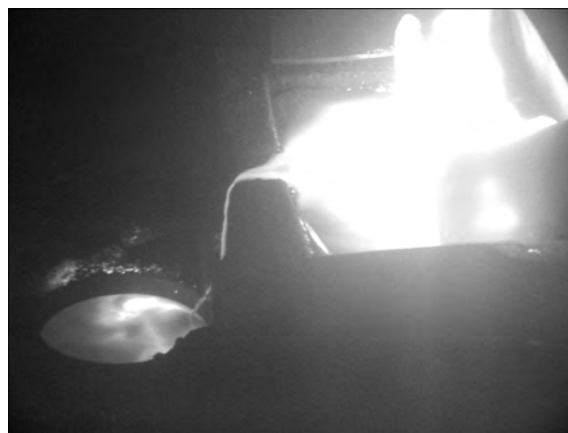


Рис. 2. Процесс плавки сплава TiNi

технологического процесса [8]. При наличии в сплаве титана, который легко присоединяет азот и кислород, необходимым условием при производстве является использование вакуумного оборудования либо защитной атмосферы (гелий или аргон).

Для получения высококачественного сплава с хорошими механическими свойствами требуется тщательный подбор первичных компонентов. Шихтой, как правило, служит йодидный титан или титановая губка, спрессованная в брикеты, а также никель марки Н-0 или Н-1.

С целью получения равномерного химического состава по сечению и высоте слитка проводят двойной или тройной переплав. Выплавку сплавов TiNi осуществляют с использованием вакуумно-индукционного и дугового способов [8]. Исходный слиток готовят в графитовых печах способом вакуумной индукционной плавки. Это позволяет достаточно просто получать хорошо смешанный сплав. Затем для улучшения химического состава, структуры и однородности производят переплав в вакуумной дуговой печи с расходуемым электродом.

Материалы с эффектом памяти формы при большом содержании титана относят к химически агрессивным расплавам. Они показывают высокую степень смачивания и полное растекание расплавов по поверхности стандартных огнеупоров (оксидов, карбидов, нитридов, графита и др.). Возможно проникновение расплава в трещины и поры тигля из огнеупорного материала, его разъедание и разрушение, и, как следствие, — насыщение и загрязнение сплава продуктами взаимодействия с элементами материала тигля, в частности кислородом, углеродом, азотом, с образованием оксидов, нитридов, карбидов титана, что вызвано большим химическим сродством этого металла к кислороду, азоту, углероду [8].

Примеси, попадающие в сплав в результате взаимодействия с тиглем, сильно влияют на качество сплава TiNi. Даже небольшие изменения в пропорциях компонентов приводят к колебанию температур мартенситного превращения. Такие загрязненные сплавы не только меняют температуру мартенситного превращения, но и могут совсем утратить возможность к последнему [9].

Таким образом, получение сплавов TiNi высокого качества не сводится к простой выплавке металлов и может быть отнесено в разряд «высоких» технологий.

Получение полуфабрикатов на основе сплавов TiNi с требуемым химическим составом и уровнем механических свойств возможно всего в нескольких странах [10].

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины накоплен огромный опыт в области выплавки слитков интерметаллидов титана способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью [11].

Электронно-лучевая плавка с промежуточной емкостью отличается высокой степенью рафинирующей способности. Получению гарантированного химического состава в узком интервале концентраций с обеспечением необходимой химической однородности в слитках при выплавке сплавов способствует применение промежуточной емкости.

Цель работы заключалась в проведении исследований и разработке технологии получения слитков Ti-46 % Ni-54 % при электронно-лучевой плавке с промежуточной емкостью.

Опытные плавки слитков диаметром 165 мм сплава TiNi выполняли на установке УЭ-208М (рис. 1).

Установка позволяет выплавлять слитки круглого сечения диаметром до 300 мм, длиной до 2000 мм, а также слитки прямоугольного сечения 450×145 мм, длиной до 1500 мм.

В качестве шихтовых материалов использовали листы титанового сплава BT1-0 и пластины катодного никеля марки Н-1. Поскольку титан и никель имеют близкие значения температуры плавления (соответственно 1645 и 1455 °С), а также упругости паров при температурах плавления, применили способ, при котором шихту в нужном процентном соотношении укладывали вперемешку в расходуемый титановый короб. После загрузки шихты установку вакуумировали. Вначале шихту сплавляли в промежуточную емкость, а затем жидкий металл периодически сливали в медный водоохлаждаемый кристаллизатор до получения слитка необходимой длины (рис. 2).



Рис. 3. Слиток сплава TiNi



Рис. 4. Дефектоскоп ультразвуковой УД4-76

В конце плавки производили вывод усадочной раковины, затем слиток охлаждали в условиях вакуума до полного остывания.

На рис. 3 представлен выплавленный слиток сплава TiNi.

Для выявления в полученном слитке внутренних дефектов в виде неметаллических включений, пор и несплошностей использовали способ ультразвуковой дефектоскопии. Исследования проводили эхо-импульсным способом при контактном варианте контроля при помощи прибора УД4-76 (рис. 4).

Пор, несплошностей и дефектов усадочного характера в слитке не обнаружено.

Методом химического анализа изучали состав сплава TiNi. Отбор проб производили вдоль слитка

на глубине 5 мм от поверхности, а в радиальном направлении (поперек слитка) — на радиусах 70, 50 и 30 мм. Исследовали три зоны — верхнюю, нижнюю и середину слитка. Результаты химического анализа сплава TiNi показали, что отклонение содержания элементов в слитке как по длине, так и по поперечному сечению не превышают 0,2 %, что является удовлетворительным результатом [12].

Таким образом, разработанная технология и опытные плавки слитков сплава TiNi способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью показали перспективность использования последнего с целью получения качественных слитков TiNi для нужд отечественной промышленности и медицины. Создание данной технологии позволяет причислить Украину к немногим странам, способным получать такой сплав.

1. Зеленов Б. А., Крылов Б. С., Лихачев В. А. Сплавы с управляемыми функциональными свойствами — прототип интеллектуальных материалов // Материалы с эффектом памяти формы: Сб. тр. — Санкт-Петербург, 1995. — Ч. III. — С. 55–58.
2. Ионайтис Р. Р., Котов В. В., Туктэров М. А. Использование сплавов с памятью формы в ядерной энергетике // Там же. — 1995. — Ч. II. — С. 133–134.
3. Рыклина Е. П., Морозова Т. В., Прокошкин С. Д. Биомедицинская инженерия в создании и применении нитиноловых эндопротезов с эффектом памяти формы // Там же. — 1995. — Ч. II. — С. 51–54.
4. Перспективы применения сплавов с эффектом памяти формы в робототехнике / В. А. Лихачев, В. А. Лопота, Ю. К. Степанов, В. И. Юдин // Там же. — 1995. — Ч. III. — С. 59–61.
5. Воронков А. В., Лихачев В. А. Исследование никелида титана в качестве рабочего тела управляемых демпферов // Там же. — Ч. I. — 1995. — С. 83.
6. The use of shape memory alloys in space building / Yu. D. Kravchenko, V. A. Lichachev, A. I. Razov et al. // Там же. — 1995. — Ч. I. — С. 58–61.
7. Никелид титана. Медицинский материал нового поколения / В. Э. Гюнтер, В. Н. Ходоренко, Ю. Ф. Ясенчук и др. — Томск: МИЦ, 2006. — 296 с.
8. Красовський П. Дослідження капілярних характеристик та плавка сплаву нікель-титан (NiTiNOL) з ефектом пам'яті форми // Адгезія расплавов и пайка матеріалов. — 2009. — Вып. 42. — С. 95–102.
9. Anokhin S. V., Lotkov A. I., Grishkov V. N. The substitution impurity influence on the succession and temperatures of martensitic transformations in TiNi // Материалы с эффектом памяти формы: Сб. тр. — Санкт-Петербург, 1995. — Ч. I. — С. 29–33.
10. Развитие научно-технических решений в медицине / В. Н. Канюков, Н. Г. Тергулов, В. Ф. Винярский, В. В. Осипов: Учеб. пособие. — Оренбург, ОГУ, 2008. — 255 с.
11. Жук Г. В., Тригуб Н. П., Замков В. Н. Получение слитков γ -алюминид титана методом ЭЛПЕ // Современ. электрометаллургия. — 2003. — № 4. — С. 20–22.
12. Основы плавки титана и сплавов на его основе в установке с холодным тиглем / А. В. Александров, Е. А. Афонин, С. А. Делло и др. // Титан. — 2010. — № 2. — С. 36–41.

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

Поступила 20.04.2011



УДК 669.187.526:51.001.57

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ МОЛИБДЕНА МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В. О. Мушегян

Проведена серия численных экспериментов по определению оптимальных режимов плавки молибденовых слитков в водоохлаждаемый кристаллизатор. Проанализировано влияние технологических параметров плавки (мощность и распределение электронно-лучевого нагрева металла в кристаллизаторе, частота и температура перегрева заливки) на характеристики затвердевания слитка. Установлена степень влияния каждого из параметров в технологически допустимых интервалах.

Series of numerical experiments have been made for determination of optimum conditions of melting the molybdenum ingots into a water-cooled mould. The effect of technological parameters of melting (power and distribution of electron beam heating of metal in mould, frequency and temperature of charge overheating) on characteristics of ingot solidification was analyzed. The degree of effect of each of parameters in technologically allowable intervals was established.

Ключевые слова: электронно-лучевой переплав; молибден; слиток; математическая модель; теплопередача; центральный и периферийный нагрев; время охлаждения; градиент температур

Применяемый при ЭЛП способ нагрева металла позволяет достаточно гибко за счет фокусировки электронного луча и сканирования им нагреваемой поверхности перераспределять плотность теплового потока в широком диапазоне значений независимо от производительности плавления металла. Это дает возможность целенаправленно воздействовать на тепловое состояние жидкой ванны в кристаллизаторе для формирования плоского фронта затвердевания [1].

С целью реализации указанной возможности в центральной зоне зеркала металлической ванны создается равномерный тепловой поток с локальным сосредоточением вблизи стенки кристаллизатора [2]. При этом центральный обогрев компенсирует потери тепла металлом за счет излучения и испарения на свободной поверхности, а периферийный обогрев — теплоотвод в стенки водоохлаждаемого кристаллизатора.

Для определения оптимальных параметров плавки молибдена в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью, соответствующих минимальной глубине жидкой ванны и плоскому фронту затвердевания использовали модель электронно-лучевой плавки молибдена в водоохлаждаемый проходной кристаллизатор [3]. Моделировали

процесс плавки в кристаллизаторы диаметром 70 и 100 мм, в ходе которой жидкий металл периодически подают из промежуточной емкости в кристаллизатор с временными паузами между заливками очередных порций. Базовым при расчетах принят режим электронно-лучевой плавки, реализованный экспериментально [3] (табл. 1).

В качестве основных параметров распределения электронно-лучевого теплового потока выделим D_R — участок вдоль радиуса зеркала ванны, на который приходится 90 % мощности периферийного обогрева W_2 , распределенной по закону Гаусса; d_R — смещение D_R на стенку кристаллизатора; W_1 — мощность центрального обогрева, равномерно распределенная на участке $0 \dots (D_R - d_R)$ поверхности зеркала ванны (рис. 1).

На рис. 2 представлена геометрия жидкой ванны к моменту окончания паузы между заливками для

Таблица 1. Технологические параметры базового (1) и расчетного (2) режимов при диаметре слитка $D = 7$ см, глубине ванны $l_z(r = R) = 0,2$ см

№ режима	W_1	W_2	$W_{\text{об}}$	$l_z (r = 0)$
	кВт			
1	8,4	49,2	60,0	0,60
2	7,4	51,2	56,6	0,38

Примечание. Здесь $W_{\text{об}}$ — общая мощность.

Примечание. Здесь W_{06} — общая мощность.

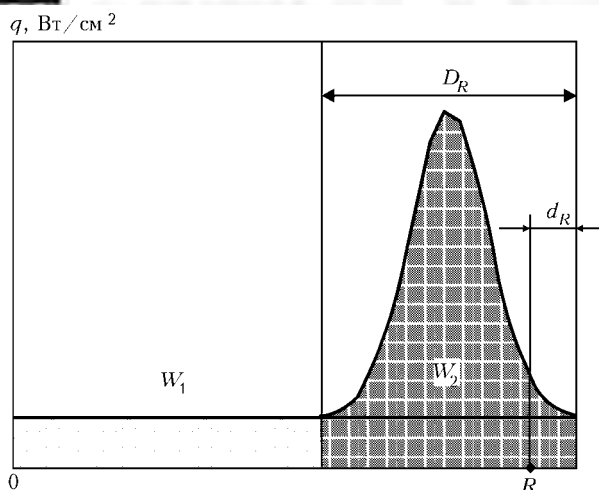


Рис. 1. Схема распределения мощности нагрева металла q на поверхности зеркала ванны в полости кристаллизатора

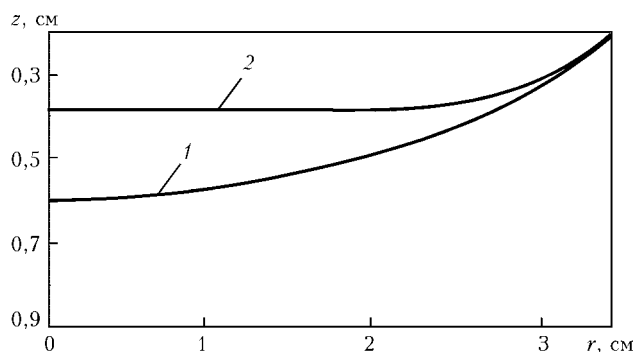


Рис. 2. Геометрия жидкой ванны к моменту окончания паузы между заливками ($D = 7$ см): z — расстояние до поверхности ванны

двух вариантов обогрева зеркала ванны (табл. 1): базового (1) и полученного при варьировании параметров W_1 , W_2 (2).

Кривые рис. 2 показывают, что путем варьирования значений W_1 , W_2 можно сформировать более плоский фронт, чем в базовом варианте, при более низкой тепловой мощности обогрева (табл. 1). Этого результата можно достичь за счет снижения плотности обогрева в центральной части ванны и ее повышения вблизи стенки кристаллизатора (рис. 3). Зона максимального температурного перегрева поверхности зеркала ванны смещается из осевой части ванны на периферийную, а перегрев металла над температурой плавления, согласно расчетам, повышается на 60°C . Для слитка диаметром 100 мм зафиксирована аналогичная качественная картина.

Проведена серия численных экспериментов с изменением смещения d_R электронного луча на стенку кристаллизатора. На рис. 3 показаны результаты расчетов для слитка диаметром 7 см при различных значениях d_R .

Как следует из рисунка, увеличение значения d_R позволяет создавать более плоский фронт затвердевания, но при этом, как показали расчеты, большее смещение периферийного обогрева на стенку кристаллизатора приводит к необходимости повышения мощности тепловложения $W_{об}$ в 1,5 раза. С учетом этих особенностей для дальнейших опти-

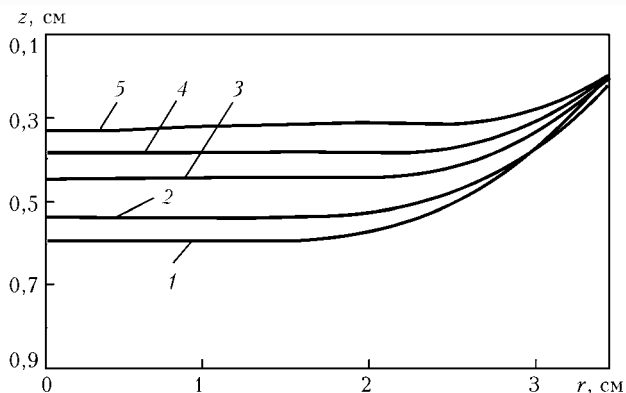


Рис. 3. Геометрия ванны к моменту окончания паузы между заливками при различных значениях d_R : 1 — 0; 2 — 0,2; 3 — 0,4; 4 — 0,6; 5 — 0,9 см

Таблица 2. Оптимизированные режимы нагрева слитка молибдена в кристаллизаторе диаметром 70 и 100 мм

D	d_R	$W_{об}$	W_1	W_2
см		кВт		
7	0,6	50,808	6,562	44,245
10	0,4	77,694	17,273	60,420

мизационных расчетов приняты параметры d_R согласно табл. 2, позволяющие создавать достаточно плоский фронт затвердевания при умеренном повышении тепловой мощности обогрева зеркала ванны.

Для оценки влияния общей мощности обогрева зеркала ванны $W_{об}$ на параметры затвердевания жидкого металла задан диапазон значений l_z ($r = R$) согласно табл. 2. Значения W_1 , W_2 подбирали таким образом, чтобы фронт был плоским и без перегибов.

На рис. 4 показана геометрия ванны и область с установленным перегревом металла ($T_X - T_L$, где $T_X = 2637$; $T_L = 2617^\circ\text{C}$ — температуры соответственно перегретого металла и точки плавления. В табл. 3 приведены данные расчетов, свидетельствующие о том, что повышать интенсивность обогрева зеркала ванны нерационально, поскольку увеличение мощности тепловложения не способствует росту

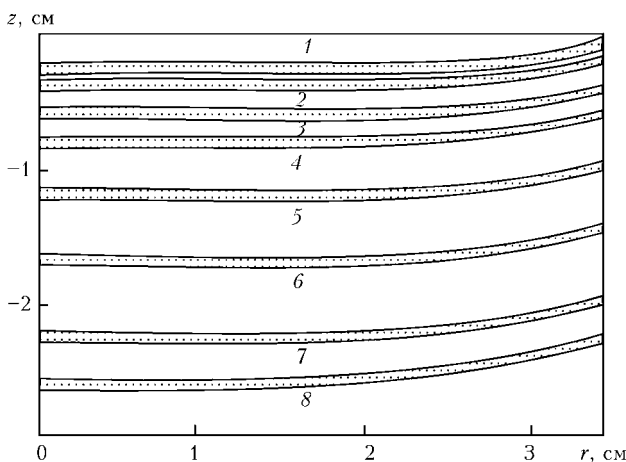


Рис. 4. Интервал $T_X - T_L$ при различных значениях мощности $W_{об}$ обогрева зеркала ванны, кВт: 1 — 55,4; 2 — 56,8; 3 — 59,6; 4 — 62,4; 5 — 67,4; 6 — 7,3; 7 — 78,2; 8 — 83,8 кВт; $D = 7$ см



Таблица 3. Технологические и теплофизические характеристики различных режимов плавки (кристаллизатор $D = 7$ см)

$l_z (r=R)$, см	$W_{об}$	W_1	W_2	G , °C/см	dt , с	$l_z (r=0)$, см
	кВт					
0,1	55,387	7,374	48,012	230,48	2,314	0,28
0,2	56,860	7,475	49,386	229,01	2,329	0,40
0,4	59,620	7,642	51,979	227,37	2,350	0,61
0,6	62,414	7,780	54,634	226,92	2,346	0,82
1,0	67,385	7,723	59,661	222,70	2,390	1,22
1,5	72,974	7,020	65,953	221,90	2,400	1,71
2,0	78,215	6,867	73,347	220,10	2,450	2,28
2,3	83,805	6,165	79,639	217,00	2,500	2,64

Таблица 4. Зависимость параметров кристаллизации от температуры перегрева ΔT

ΔT , °C	$l_z (r=0)$, см	$l_z (r=R)$, см	dt , с	G , °C/см
$D = 7$ см				
0	0,76	0,20	5,19	256,70
40	0,76	0,20	5,19	257,02
80	0,76	0,20	5,19	256,97
140	0,76	0,20	5,19	256,85
$D = 10$ см				
0	0,370	0,099	3,389	202,36
40	0,371	0,099	3,389	202,33
80	0,373	0,099	3,391	202,22
140	0,375	0,099	3,393	202,07

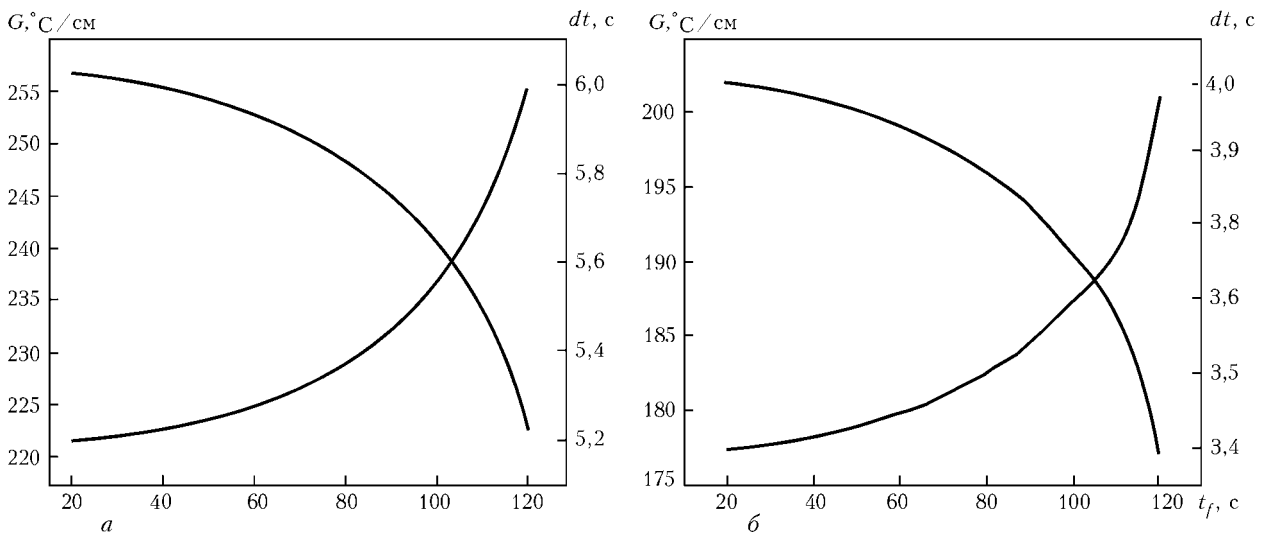


Рис. 5. Зависимость градиента температуры перед фронтом затвердевания и времени пребывания металла t_f в заданном температурном интервале (2637...2617 °C) от времени литья (период подачи металла 120 с) при D : а – 7; б – 10 см

показателей затвердевания жидкого металла. Напротив, при уменьшении мощности обогрева жидкого металла в кристаллизаторе улучшаются теплофизические характеристики процесса кристаллизации молибдена: несколько увеличивается градиент температур G вдоль движения фронта кристаллизации и уменьшается временной интервал охлаждения dt (соответственно повышается скорость охлаждения). Аналогичные зависимости зафиксированы для слитка диаметром 100 мм.

Исследовано влияние периодичности заливки и перегрева поступающего в полость кристаллизатора металла выше температуры плавления на тепловое состояние слитка. Моделировали заливку металла с периодом 120 с, при которой время собственно заливки изменяли в пределах 20...120 с, а пауза между заливками составляла 0...100 с.

На рис. 5 приведены средние по периоду численные данные, показывающие влияние соотношения времени литья и паузы на параметры затвердевания жидкой ванны. Из представленных данных следует, что при соотношении времени литья и паузы 20:100 и 120:0 (непрерывное литье) время пребывания в заданном температурном интервале и

градиент температуры перед фронтом затвердевания изменяются на 13 %, наилучшие показатели отмечены при минимальном времени литья 20 с.

Данные расчетов (табл. 4) также показывают, что изменение ΔT (перегрев поступающего в полость кристаллизатора металла над температурой ликвидус) в пределах 0...140 °C не приводит к существенному колебанию параметров жидкотеплофизической ванны, следовательно, повышение перегрева сливаемого металла нерационально, поскольку при этом увеличиваются энергозатраты на стадии промежуточной емкости.

Выводы

1. Расчетным путем установлено, что применение центрального и периферийного нагревов металла в кристаллизаторе при плавке слитков молибдена диаметром 7 и 10 см в электронно-лучевой печи позволяет при минимальной глубине жидкой ванны добиться практически плоского фронта кристаллизации.

2. Определены основные параметры, влияющие на процесс кристаллизации молибдена при ЭЛПЕ, —



мощность электронно-лучевого нагрева, смещение луча на кристаллизатор, соотношение времени литья и паузы. Вместе с тем, перегрев сливаемых порций над температурой ликвидус влияет не столь существенно.

1. *Электронно-лучевая плавка* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 265 с.
2. *Жук Г. В.* О влиянии распределения мощности нагрева металла в кристаллизаторе в процессе ЭЛПЕ на структуру

титановых слитков // Современ. электрометаллургия. — 2008. — № 2. — С. 17–20.

3. *Мушегян В. О.* Математическое моделирование электронно-лучевой плавки молибдена // Там же. — 2011. — № 3. — С. 13–16.

ГП НТЦ «Патон-Армения» ИЭС им. Е. О. Патона

НАН Украины, Киев

Поступила 26.10.2011

УДК 669.187.826

ОЧИСТКА КРЕМНИЯ ОТ ФОНОВЫХ И ЛЕГИРУЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ БЕСТИГЕЛЬНОЙ ЗОННОЙ ПЛАВКЕ

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

Приведены данные о влиянии стерильности вакуумной плавильной камеры на содержание фоновых и легирующих примесей в монокристаллах кремния, полученных способом электронно-лучевой бестигельной зонной плавки.

Data are given about the effect of sterility of vacuum melting chamber on content of background and alloying impurities in silicon single crystals produced by electron beam crucibleless zonal melting.

Ключевые слова: электронно-лучевая зонная плавка; вакуум; кремний; гелий; кислород; фосфор

Проблема очистки кремния от примесей, особенно кислорода, является актуальной при использовании его в качестве радиационно-стойкого материала, в частности для создания высокоэффективных счетчиков ядерных излучений, солнечных батарей, приборов, расположенных на внешней поверхности станции и подвергаемых жесткому облучению частицами высоких энергий. Наличие кислорода в кремнии уменьшает быстродействие электронных приборов и служит причиной невоспроизводимости параметров таких приборов, как импульсные и переключающие диоды, диоды СВЧ и др. [1].

В некоторых случаях при получении монокристаллов кремния с р-проводимостью необходимо осуществлять очистку также и от легирующих примесей, например фосфора.

В настоящее время чистота кремния по легирующим примесям доведена до $1 \cdot 10^{13} \dots 1 \cdot 10^{14}$ ат/см³, а содержание фоновой примеси — кислорода в кристаллах, выращенных разными способами, — до $1 \cdot 10^{17} \dots 1 \cdot 10^{18}$ ат/см³.

В процессе электронно-лучевой бестигельной зонной плавки происходит очистка кремния от ле-

гирующих и фоновых примесей [2] как вследствие отгонки, вызываемой зонной перекристаллизацией, так и десорбции примесей с поверхности образца при значениях температуры, близких к таковым кристаллизации. Причем по этой схеме из расплава будут удаляться примеси с упругостью пара выше, чем у кремния [3].

На содержание примесей в кремнии влияет остаточная атмосфера плавильной вакуумной камеры, в которой проводится зонная электронно-лучевая плавка, причем одним из главных параметров является степень вакуума в камере.

Для определения возможности очистки кремния от кислорода выполнили расчет концентрации кислорода в остаточной атмосфере вакуумной камеры:

$$P = nkT, \quad (1)$$

где P — парциальное давление кислорода, Па; n — количество атомов кислорода, см³; k — постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град; T — температура в камере, К. Остаточное давление в камере, подготовленной для плавки кремния, обычно составляет $2 \cdot 10^{-5}$ торр ($2,7 \cdot 10^{-3}$ Па) при температуре 300 К. Можно допустить, что отношение парциального



давления кислорода к остаточному давлению в камере, как и в воздушной атмосфере равно 1:5. Тогда парциальное давление кислорода с учетом приведенного соотношения составляет $5,7 \cdot 10^{-4}$ Па. С использованием формулы (1) получили концентрацию кислорода в вакууме $n = 2,8 \cdot 10^{11}$ ат/см³. Это должно способствовать десорбции примесей с поверхности образца кремния в ходе плавки.

При открывании камеры в нее попадает воздух, происходит интенсивная адсорбция молекул газов и влаги на поверхности оборудования и стенки камеры. Это влияет на уменьшение вакуума в камере. Существуют способы подготовки вакуумной камеры с целью увеличения степени ее вакуума, таких как предварительный прогрев камеры до температуры 400... 450 °С, инфракрасное и ультрафиолетовое облучение стенок камеры, арматуры и др. Однако они не совсем подходят по ряду следующих причин.

В конструкции плавильной вакуумной камеры используют различные резиновые уплотнения, прокладки, детали из фторопласта и др., что существенно затрудняет использование термического способа очистки. Облучение стенок камеры инфракрасными и ультрафиолетовыми лучами усложняет технологический процесс подготовки камеры.

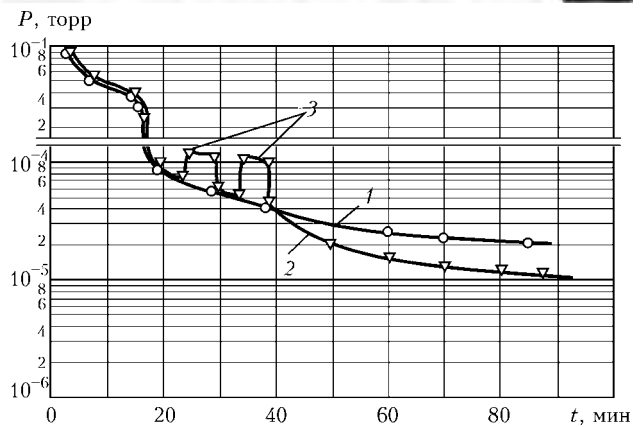
Эффективным и простым способом подготовки вакуумной камеры с целью увеличения степени вакуума является ее промывка высокочистым гелием в процессе откачки.

При промывке камеры гелием последний активно сметает адсорбированные примеси, являясь своеобразной «метлой» [4]. Молекулы гелия, ударяясь о стенки камеры и арматуры, ослабляют силу взаимодействия адсорбированных молекул газов и влаги, создают благоприятные условия для их десорбции и уноса в процессе откачки, т. е. интенсифицируют дегазацию камеры.

Данный процесс должен приводить к уменьшению возможности загрязнения кремния активными газами, прежде всего кислородом, вследствие десорбции его при нагреве камеры, а также оборудования при плавке.

Установлено, что для очистки монокристаллов кремния при электронно-лучевой бестигельной зонной плавке, в частности от кислорода, необходимо, чтобы натекание в плавильную камеру (поступление активных газов через микронесплошности вакуумных уплотнений и десорбции со стенок камеры и арматуры) составляло не более $2 \cdot 10^{-4}$ л.торр/с.

Промывку камеры гелием осуществляли через специальный нагнетатель при расходе гелия 30 см³/мин. Проведено две промывки по 10 мин каждая. Интервал между промывками составлял 10 мин. Количество промывок и интервал между ними определяли в зависимости от продолжительности минимальной откачки камеры для выхода ее на рабочий режим ($2 \cdot 10^{-5}$ торр).



Влияние промывки гелием на глубину вакуума в камере при разном времени откачки: 1 — откачка без промывок гелием; 2 — то же, с промывкой; 3 — промывки

На рисунке показано влияние промывки гелием на глубину вакуума в камере при разной длительности откачки. Как следует из рисунка, после проведения промывок глубина вакуума повышается примерно в 2 раза (от $2,1 \cdot 10^{-5}$ до $1,2 \cdot 10^{-5}$ торр) при одном и том же времени откачки. При этом натекание составило $2 \cdot 10^{-4}$ л.торр/с при объеме плавильной камеры 0,028 м³.

Исследования с использованием метода ИК спектроскопии показали, что после промывки камеры гелием и с увеличением глубины вакуума содержание кислорода снижается более чем на порядок (от $6 \cdot 10^{16}$ до $5 \cdot 10^{15}$ ат/см³), по сравнению с вакуумом, полученным в камере без промывки (рисунок).

Исследовано влияние подготовки вакуумной плавильной камеры на содержание фосфора в кремнии. С помощью холловских измерений и электронного парамагнитного резонанса показано, что при применении подготовки камеры, указанной выше, содержание фосфора снижается на порядок (от $8 \cdot 10^{13}$ до $1 \cdot 10^{13}$ ат/см³).

Таким образом, увеличение стерильности плавильной вакуумной камеры при электронно-лучевой плавке кремния позволяет значительно снизить содержание легирующих и фоновых примесей в выплавленных монокристаллах.

1. Получение сверхчистых объемных полупроводниковых материалов в условиях космического вакуума / Б. Е. Патон, Е. А. Аснис, С. П. Заболотин и др. // Космічна наука і технологія. — 2003. — 9, № 5/6. — С. 30–32.
2. Пфанн В. Зонная плавка. — М: Мир, 1970. — 368 с.
3. Мультикристаллический кремний для солнечной энергетики / А. И. Непомнящих, В. П. Еремин, Б. А. Красин и др. // Материалы электронной техники. — 2002. — № 4. — С. 16–24.
4. Stoner D. R., Lessman G. G. Measurement and Control of Weld Chamber Atmospheres // Weld. J. — 1965. — 44, № 8. — P. 337–346.

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

Поступила 23.03.2011



УДК 669.187.58

ОХЛАЖДАЕМЫЕ КРИСТАЛЛИЗАТОРЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СЛИТКОВ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА РАСПЛАВ

И. В. Шейко, В. А. Шаповалов,
В. В. Якуша, Ю. А. Никитенко, Д. М. Жиров

Рассмотрены особенности индукционной плавки в секционном кристаллизаторе и передачи энергии высокочастотного электромагнитного поля от индуктора к металлической ванне. Показано, что секционные кристаллизаторы представляют собой весьма сложные в конструктивном отношении агрегаты, функциональные возможности которых значительно шире, чем у кристаллизаторов традиционной конструкции. Они участвуют не только в формообразовании слитка, но и в передаче энергии электромагнитного поля от индуктора или другой электромагнитной системы к расплаву, что в ряде случаев повышает технико-экономические показатели переплавных процессов (например, ЭЛП и ЭШП) и качественные характеристики выплавленного металла. Степень передачи энергии в металлическую ванну в значительной мере зависит от конструкции водоохлаждаемых секций.

Peculiarities of induction melting in a sectional mould and transmission of energy of high-frequency electromagnetic field from inductor to metal pool are considered. It is shown that the sectional moulds represent units of a complicated design, the functional capabilities of which are much wider than in moulds of a traditional design. They effect not only on the ingot formation, but also on transmission of electromagnetic field energy from inductor or other electromagnetic system to the melt, thus increasing in some cases the technical-economical characteristics of remelting processes (for example EBR and ESR) and quality characteristics of the produced metal. The degree of energy transmission into metal pool depends to a large extent on the design of water-cooled sections.

Ключевые слова: секционный кристаллизатор; индуктор; поддон; загрузка; металлическая ванна; расходующая заготовка; электромагнитное поле

В современных переплавных способах, основанных на применении электрических источников нагрева (вакуумно-дуговой — ВДП, электрошлаковый — ЭШП, электронно-лучевой — ЭЛП и плазменно-дуговой переплавы — ПДП) формирование слитка во время плавки происходит в медном охлаждаемом кристаллизаторе. Конструктивные решения этих устройств весьма разнообразны и определяются особенностями того или иного процесса.

Так, большинство кристаллизаторов для ВДП и ЭШП представляют собой водоохлаждаемую изложницу, у которой формирующая гильза выполнена из меди и помещена в стальную обечайку (рубашку). В кольцевой зазор между гильзой и обечайкой подается охлаждающая вода. Высота (длина) таких кристаллизаторов, как правило, превы-

шает длину слитка, поскольку слиток наплавляется путем переплава расходующего электрода непосредственно в кристаллизаторе [1–3].

Формирование слитков в печах ЭЛП и ПДП происходит в результате переплава расходующих заготовок, которые размещают над кристаллизатором, а слиток в процессе плавки вытягивают из кристаллизатора. Высота такого кристаллизатора, как правило, не превышает диаметра выплавленного слитка, поскольку во время плавки в кристаллизаторе располагается металлическая ванна, а слиток находится ниже кристаллизатора [2, 4–7].

Во второй половине прошлого века заметное развитие за рубежом и у нас в стране получили способы индукционной плавки высокореакционных металлов, в которых вместо тигля из огнеупорного материала используются так называемые холодные тигли или охлаждаемые секционные кристаллизаторы. Эти процессы известны как индукционная плавка



в холодном тигле (ИПХТ) и индукционный переплав в секционном кристаллизаторе (ИПСК) [8–15].

Источником тепловой энергии при ИПСК является электромагнитное поле, создаваемое переменным током, протекающим в индукторе. Условия передачи энергии электромагнитного поля при ИПСК отличаются от таковых обычной индукционной плавки, поскольку между индуктором и загрузкой находится стенка секционного кристаллизатора.

В отличие от других переплавных процессов (ВДП, ЭШП, ЭЛП и ПДП), в которых формирование слитка также происходит в охлаждаемом кристаллизаторе и он является только конструктивным элементом, формирующим слиток, при ИПСК кристаллизатор служит еще и электроэнергетическим звеном в электрической силовой цепи. Таким образом, от конструкции секционного кристаллизатора зависит не только качество выплавляемого слитка, но и электроэнергетические показатели процесса.

Во внутреннем объеме кристаллизатора вследствие протекания индуцированных токов в секциях создается электромагнитное поле. Кроме того, через зазоры между секциями проникает электромагнитное поле, создаваемое током индуктора. Поэтому суммарное электромагнитное поле весьма неоднородно. В зоне, расположенной напротив стыков секций, напряженность электромагнитного поля значительно выше, чем в зонах напротив секций.

Экспериментально установлено, что путь протекания тока, индуцированного в секциях, зависит от конструкции секций. В поперечном сечении каждая секция имеет четыре стенки со своим функциональным назначением.

Так, в наружной стенке, обращенной к индуктору, происходит наведение тока, создаваемого электромагнитным полем индуктора. Ток, протекающий по внутренней стенке секции (обращенной к загрузке), индуцирует токи в поверхностном слое загрузки, и поэтому внутренняя стенка секции служит индуктором для загрузки. Радиальные стенки секции являются токоподводами, обеспечивающими подвод тока к внутренним стенкам секций. Таким образом, для сокращения электрических потерь в кристаллизаторе необходимо уменьшать длину радиальных (боковых) стенок секций.

При одинаковой толщине стенок секций, что характерно для секций, изготовленных из профилированной медной трубки (рис. 1, а), индуцированный кольцевой ток протекает равномерно по толщине стенки. Если толщина стенки секции неодинакова, что имеет место в случае сверленных каналов для протока охлаждающей воды (рис. 1, б), то кольцевые токи протекают по кратчайшему пути. В результате, они огибают края у стыков радиальных и внутренней стенки, что способствует образованию краевых «мертвых» зон с обеих сторон внутренней стенки. Это приводит к уменьшению длины индуцирующей части внутренней стенки секции, особенно при работе на токах средней и низкой частоты (2,5... 8,0 кГц и меньше), поскольку с умень-

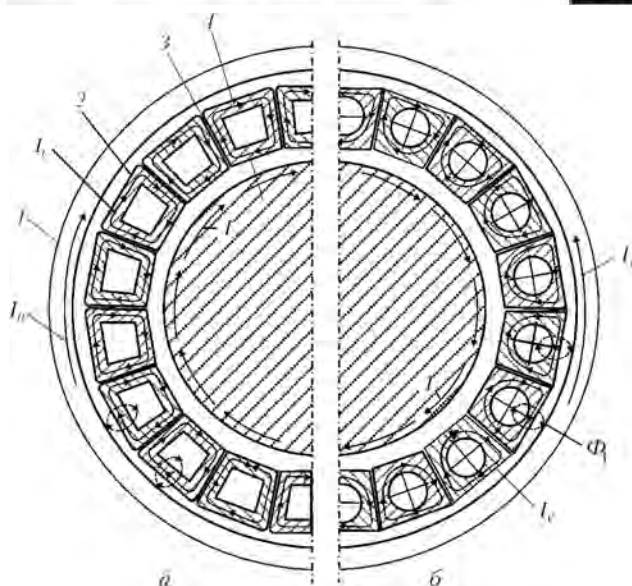


Рис. 1. Схема протекания токов в элементах системы индуктор–кристаллизатор–загрузка в зависимости от толщины стенки секции кристаллизатора: а – одинаковая по периметру; б – различная по периметру; 1 – индуктор; 2 – секции кристаллизатора; 3 – диэлектрическая прокладка; 4 – загрузка; I_s – ток, индуцированный в поверхностном слое загрузки; I_c – ток, индуцированный в секции; I_n – ток индуктора; Φ_1 – магнитный поток секции

шением частоты электрического тока поверхностный эффект значительно снижается и тепловыделение в загрузке заметно падает, а следовательно, уменьшается электрический КПД системы индуктор–кристаллизатор–загрузка.

Экспериментально установлено, что в макете загрузки, размещенной в секционном кристаллизаторе, секции которого изготовлены из профилированной медной трубки, на частоте рабочего тока 2,4 кГц выделяется в среднем 36... 40 % тепловой энергии. В том же макете загрузки, установленной в кристаллизатор, секции которого имеют сверленные каналы для протока охлаждающей воды, выделяется всего 27... 32 % тепловой энергии, т. е. на 8... 12 % меньше.

По принципу формирования слитка секционные кристаллизаторы можно разделить на две группы: кристаллизаторы-изложницы, в которых слиток получают без его перемещения в ходе плавки относительно стенки кристаллизатора; кристаллизаторы, из которых при плавке слиток вытягивают с помощью специального механизма (кристаллизаторы скольжения).

Каждая из этих схем широко применяется на практике и имеет как преимущества, так недостатки. Основным достоинством выплавки слитков в кристаллизаторе-изложнице является отсутствие перемещения слитка относительно стенки кристаллизатора во время плавки. В этом случае кристаллизатор и слиток не испытывают механических нагрузок, вызванных трением слитка о формирующую стенку кристаллизатора, что существенно повышает ресурс работы кристаллизатора. Кроме того, исключается образование трещин в слитке из металлов и сплавов, имеющих низкую пластичность даже при высоких температурах.

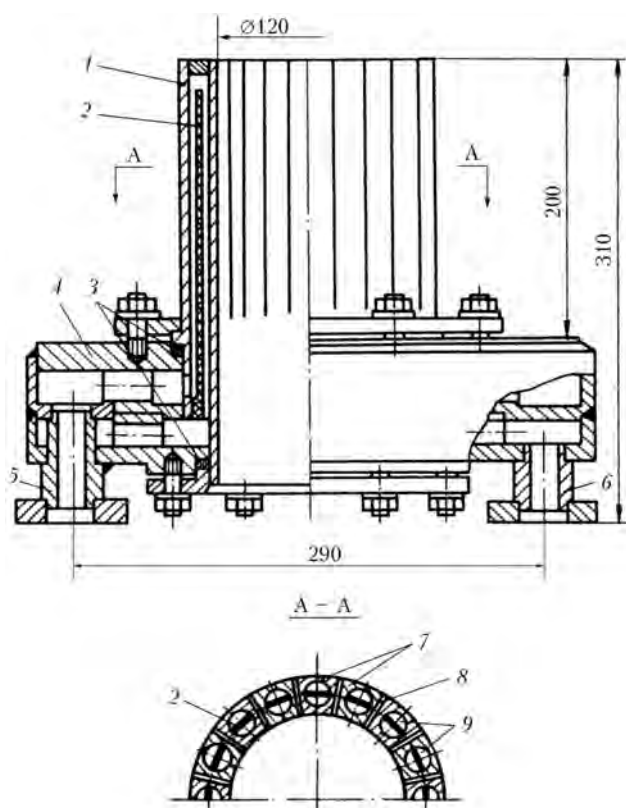


Рис. 2. Конструкция секционного (скользящего) кристаллизатора для индукционной выплавки слитков с вытягиванием их во время плавки: 1 — формирующая гильза; 2 — дефлектор; 3 — уплотнительные кольца; 4 — водяной коллектор; 5 — патрубок для подвода охлаждающей воды; 6 — патрубок для отвода воды; 7 — секции; 8 — диэлектрические прокладки; 9 — каналы для протока воды

Недостаток этой схемы заключается в большой металлоемкости секционного кристаллизатора, сложной технологии его изготовления и, соответственно, высокой стоимости.

К преимуществам схемы с вытягиванием слитка следует отнести небольшие металлоемкость и стоимость секционных кристаллизаторов, поскольку общая высота формирующей гильзы, как правило, не превышает два диаметра слитка. Основным недостатком этой схемы является невозможность выплавки слитков из металлов и сплавов, имеющих малую пластичность, и поэтому в процессе вытягивания не исключено образование поперечных трещин, а иногда происходит и разрыв слитков.

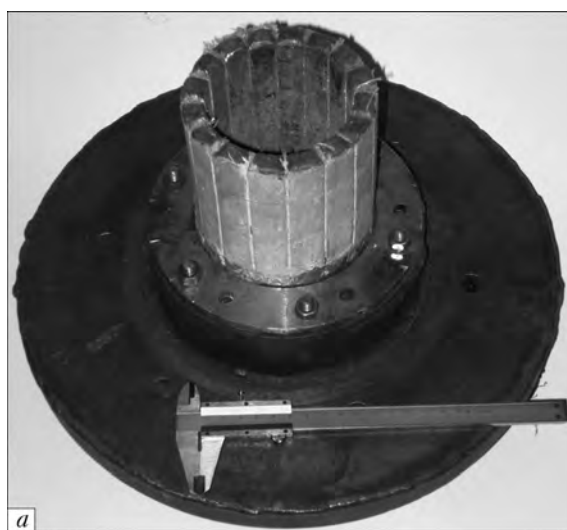


Рис. 3. Секционный скользящий кристаллизатор диаметром 80 мм для ИПСК: а — общий вид; б — формирующая секционная гильза

Кристаллизаторы для индукционной выплавки слитков путем их вытягивания представляют собой конструкцию, состоящую из медной секционированной гильзы и водяного коллектора (рис. 2, 3). Основные технические характеристики кристаллизаторов приведены в табл. 1.

Формирующая секционная гильза изготавливается из толстостенной медной трубы (толщина стенки от 25 мм и более) путем фрезерования в ней ради-

Таблица 1. Технические характеристики кристаллизаторов скольжения для ИПСК

$D_{\text{вн.кр}}$	$D_{\text{н.кр}}$	Высота рабочей части гильзы, мм	Количество секций, шт.	Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	Особенности конструкции
мм	мм				
55	85	70	12	0,8...1,2	Каналы для воды сверленные диаметром 10 мм
68	98	80	12	0,8...1,2	Каналы для воды фрезерованные размером 8×8 мм
80	110	95	14	1,0...1,5	Каналы для воды сверленные диаметром 10 мм
100	135	120	16	1,5...2,0	Каналы для воды фрезерованные размером 10×8 мм
150	185	175	16	2,0...2,5	Каналы для воды сверленные диаметром 12 мм

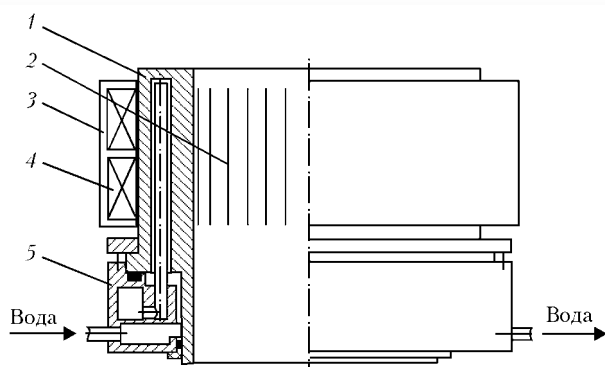


Рис. 4. Принципиальная схема кристаллизатора для ЭЛП с системой электромагнитного перемешивания [16]: 1 — водоохлаждаемая медная гильза; 2 — разрезы в зоне размещения катушек; 3 — магнитопровод; 4 — электромагнитная катушка; 5 — водяной коллектор

альных прорезей, образующих продольные секции. Для обеспечения электрической изоляции секций в зоне индуктора устанавливают тонкие диэлектрические полоски из термостойкого материала. Чаще всего для этого используют стеклоткань. Далее производят обжатие гильзы при помощи специальных хомутов, и стеклоткань механически зажимается между секциями, обеспечивая их электроизоляцию.

Каналы для потока охлаждающей воды в секциях выполняют путем сверления или фрезерования. Первый способ технологически проще, однако в этом случае секции имеют переменную толщину стенок, что приводит к снижению передаваемой в нагрузку энергии.

Фрезерование каналов для потока воды обеспечивает одинаковую толщину стенок секций по сечению. Поэтому несмотря на более сложную технологию изготовления гильзы это экономически оправдано, поскольку КПД такого кристаллизатора выше. Формирующую поверхность гильзы после опрессовки можно обработать на токарном станке или шлифовать, что позволяет уменьшить усилие трения слитка при вытягивании.

Формирующую гильзу кристаллизатора следует изготавливать из деформированного металла. Применение заготовок из литого металла нежелательно, поскольку в нем возможно наличие микропор и газовых раковин, которые могут стать причиной прожога кристаллизатора во время плавки. Для разделения потоков воды в каналах секций в каждой из них устанавливают перегородки. Материал перегородок должен быть неэлектропроводным во избежание перетока индуцированных токов в секциях.

Формирующую гильзу устанавливают в водяном коллекторе, а герметичность соединения гильзы с коллектором обеспечивают путем использования уплотнительных резиновых колец. Равномерность водяного потока от коллектора к гильзе создают за счет множества отверстий, выполненных в коллекторе.

Кристаллизаторы аналогичной конструкции в последние годы нашли применение в литейных плавильных установках для электронно-лучевой плавки (рис. 4). Они позволяют в процессе плавки осу-

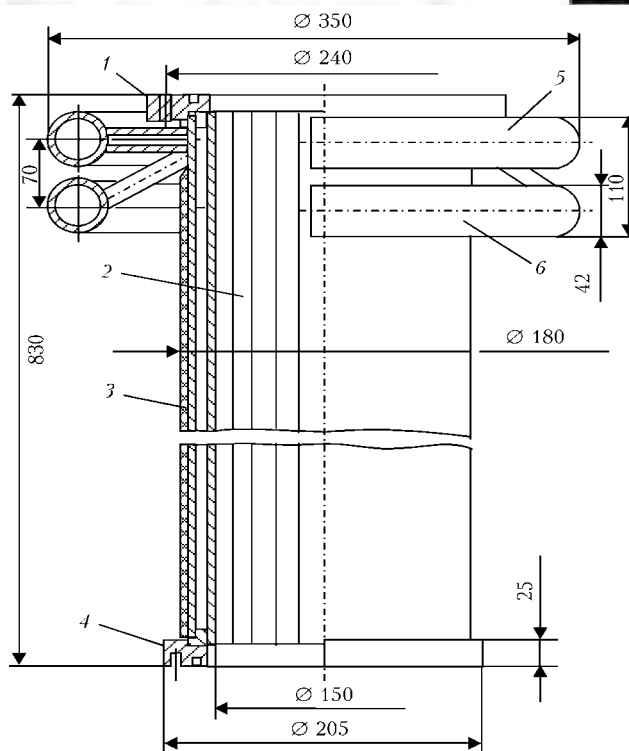


Рис. 5. Конструкция секционного кристаллизатора-изложницы диаметром 200 мм для выплавки слитков способом ИПСК (плавильная установка ОП-151): 1 — верхний фланец; 2 — секции из профилированной медной трубки; 3 — герметичная оболочка из стеклоткань; 4 — нижний фланец; 5 — напорный водяной коллектор; 6 — сливной водяной коллектор

ществлять перемешивание металлической ванны благодаря электромагнитным катушкам, питающимся от сети переменного тока.

Медная водоохлаждаемая гильза таких кристаллизаторов в зоне катушек имеет вертикальные радиальные прорезы, делящие гильзу на секции. Благодаря этим прорезам электромагнитное поле, создаваемое катушками, проникает во внутренний объем кристаллизатора и вызывает перемешивание металлической ванны.

Вследствие электромагнитного перемешивания при ЭЛП удельный расход электроэнергии сокращается почти вдвое, уменьшается продолжительность плавки и возрастает слив металла [16].

Другой разновидностью секционных кристаллизаторов для ИПСК являются кристаллизаторы-изложницы, представляющие собой более металлоемкую конструкцию, чем кристаллизаторы скольжения, поскольку они длиннее, чем выплавляемые слитки. Формирующая гильза таких кристаллизаторов собирается из профилированной медной трубки, имеющей в сечении трапециевидную форму (рис. 5). Применение профилированных трубок существенно упрощает технологию производства секций. Однако при толщине стенки более 2,0...2,5 мм, необходимой для кристаллизаторов, рассчитанных на выплавку крупных слитков, возникают трудности с профилированием трубок.

Секции крупных кристаллизаторов необходимо изготавливать с применением фрезерования длинномерных медных прутков для придания им трапеци-

Таблица 2. Техническая характеристика кристаллизаторов-изложниц для ИПСК

$D_{кр}$, мм	Общая высота, мм	Количество секций, шт.	Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	Особенности конструкции
60	400	16	1,0...1,5	Водяной коллектор разборной
80	400	20	1,0...1,8	То же
160	370	24	2,2...2,8	»
225	800	24	2,5...3,2	Водяной коллектор из кольцевых трубок
300	610	28	3,0...4,0	Водяной коллектор разборной

евидной формы снаружи и получения внутренних каналов для протока воды.

Электрическая изоляция секций обеспечивается путем нанесения на боковые сопрягаемые стенки оксида алюминия при помощи газотермического напыления либо наклеивания ленты из стеклоткани. К торцам гильзы с обеих сторон приваривают по фланцу, что позволяет крепить кристаллизатор верхним фланцем к плавильной камере или бункеру установки, а к нижнему — присоединять поддон. Технические характеристики кристаллизаторов этого типа приведены в табл. 2.

Водяные коллекторы первых кристаллизаторов были изготовлены из труб, согнутых в кольца, которые охватывали гильзу по периметру (рис. 5). Подвод и отвод воды к секциям осуществлялся при помощи медных штуцеров, присоединенных радиально между секциями и коллекторами.

В дальнейшем конструкция водяных коллекторов претерпела изменения, и водоснабжение секций происходит без применения радиальных штуцеров, а сами коллекторы выполняют разборными (рис. 6, а). Это существенно упростило обслуживание кристаллизаторов, внешний вид стал более эстетичным (рис. 6, б).

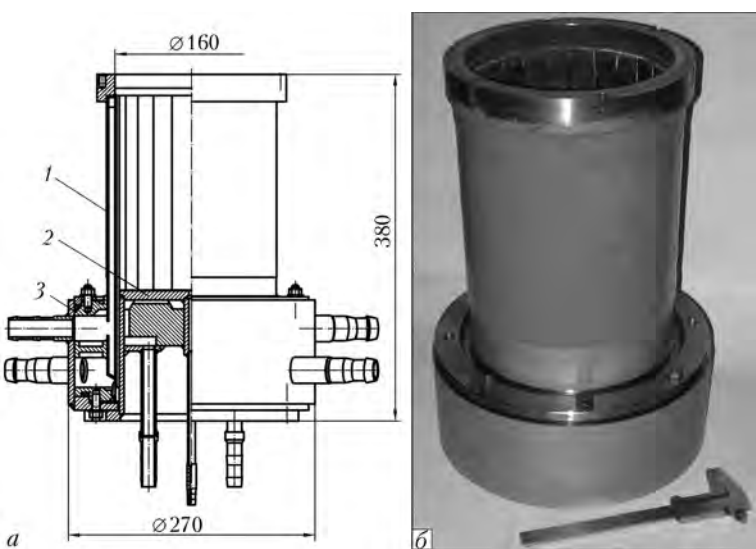


Рис. 6. Секционный кристаллизатор с разборным водяным коллектором: а — в разрезе; б — общий вид; 1 — секционная гильза; 2 — поддон; 3 — водяной коллектор

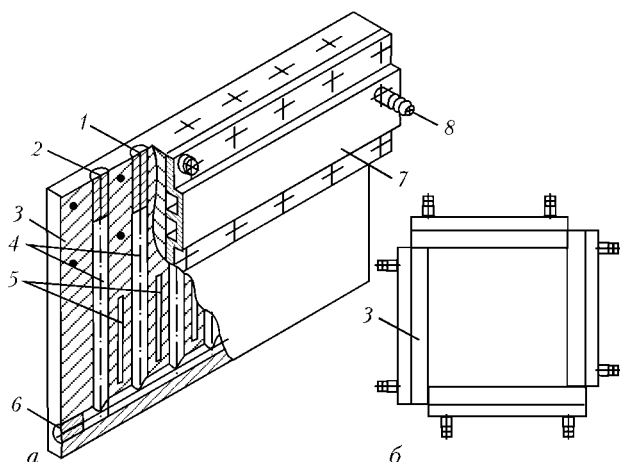


Рис. 7. Конструкция секционной панели сборного кристаллизатора: а — в разрезе; б — схема сборки кристаллизатора; 1, 2 — заглушки; 3 — медная панель; 4 — каналы для протока охлаждающей воды; 5 — межсекционные прорезы; 7 — водяной коллектор; 8 — штуцер

Для герметизации рабочего объема кристаллизатора его гильзу по всей высоте покрывают оболочкой из стеклоткани толщиной 3,0...3,5 мм, которую получают путем послойной намотки стеклоленты с пропиткой каждого слоя эпоксидным клеем. Оболочка из стеклоткани придает кристаллизатору дополнительную конструктивную жесткость и прочность.

Кристаллизаторы аналогичной конструкции находят применение в процессах магнитоуправляемой ЭШП при выплавке высокорективных металлов и сплавов [17]. Как и в случае ЭЛП, электромагнитное поле, создаваемое переменным током в катушке, охватывающей секционированную гильзу кристаллизатора по периметру, проникает во внутренний объем кристаллизатора и вызывает перемешивание металлической ванны. Это способствует усреднению химического состава металла в объеме металлической ванны и измельчению зерен при кристаллизации слитка.

В последние годы индукционная плавка в секционном кристаллизаторе широко применяется при производстве слитков кремния для солнечной энергетики [18–22]. Во Франции (фирма «Emix») и Японии (фирма «Sumko Solar Corporation») работают индукционные плавильные установки, которые позволяют выплавлять крупные слитки мульткристаллического кремния сечением 400×400 мм и длиной в несколько метров.

Выплавка этих слитков производится в составных панельных кристаллизаторах. На рис. 7 приведена одна из конструкций секционной охлаждаемой панели, используемой для сборки такого кристаллизатора. Панель в зоне индуктора разделена прорезями на вертикальные секции, в каждой из которых имеется канал для протока охлаждающей воды. Все панели имеют по водяному коллектору и



поэтому из них достаточно просто собирать кристаллизатор заданной конфигурации, в данном случае квадратной формы. Кристаллизатор работает в герметичной плавильной камере установки.

Таким образом, секционные кристаллизаторы представляют собой весьма сложные в конструктивном отношении агрегаты, функциональные возможности которых значительно шире, чем у кристаллизаторов традиционной конструкции. Они участвуют не только в формообразовании слитка, но и в передаче энергии электромагнитного поля от индуктора или другой электромагнитной системы к расплаву, что в ряде случаев повышает технико-экономические показатели переплавных процессов (например ЭЛП и ЭШП), а также качественные характеристики выплавленного металла. Поэтому область применения этих агрегатов с каждым годом расширяется.

1. *Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: Учебник для вузов.* — 2-е изд. / А. Д. Свенчанский, И. Т. Жердев, А. М. Кручинин и др. — М.: Энергоиздат, 1981. — 296 с.
2. *Сатко А.И.* Механическое оборудование цехов спецэлектрометаллургии. — М.: Металлургия, 1983. — 200 с.
3. *Электрошлаковые печи* / Б. И. Медовар, Л. М. Ступак, Г. А. Бойко и др. — Киев: Наук. думка, 1976. — 414 с.
4. *Патон Б. Е., Мовчан Б. А., Тихоновский А. Л.* Анализ современных способов плавки и рафинирования металла в электронно-лучевых печах // Рафинирующие переплавы: Сб. ст. — Киев: Наук. думка, 1974. — С. 179–195.
5. *Мовчан Б. А.* Электронно-лучевая плавка и испарение в современных металлургии и машиностроении // Сварка и специальная электрометаллургия. — Киев: Наук. думка, 1984. — С. 259–264.
6. *Плазменно-дуговой переплав металлов и сплавов* / Б. Е. Патон, В. И. Лакомский, Д. А. Дудко и др. // Автомат. сварка. — 1966. — № 8. — С. 1–5.
7. *Бортничук Н. И., Крутянский М. М.* Плазменно-дуговые плавильные печи. — М.: Энергоиздат, 1981. — 120 с.
8. *Shippereit G. H., Leatherman A. F., Everts D. S.* Cold-crucible induction melting of reactive metals // J. of Metals. — 1961. — № 2. — P. 140–143.
9. *Clites P. G., Beall R. A.* Induction-slag melting of titanium. Kept. Investing. Bur. Mines // U.S. Dept. Interior. — 1969. — № 7268. — P. 1–20.
10. *Качур Л. И.* Индукционная печь с секционированным тиглем для плавки металлов и сплавов // Научно-технические достижения. ВНИИМИ: Сб. тр. — М., 1987. — С. 65–68.
11. *Фомин Н. И.* Определение параметров системы индуктор-тигель-садка в индукционных печах с холодным тиглем // Исследование в области промышленного электронагрева: Труды ВНИИЭТО. — М.: Энергия, 1981. — Вып. 7. — С. 65–71.
12. *Тир Л. Л., Чайкин П. М., Никольский Л. Е.* Индукционные плавильные печи с холодным тиглем // Электротермия. — 1968. — Вып. 73–74. — С. 68–71.
13. *Индукционный переплав в секционном кристаллизаторе, возможности и перспективы применения его для переплава титановых отходов* / Ю. В. Латаш, И. В. Шейко, В. Н. Бернадский и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1986. — № 2. — С. 64–70.
14. *Дистилляционное рафинирование черного литрия при индукционном переплаве в секционном кристаллизаторе (ИПСК)* / И. В. Шейко, Ю. В. Латаш, Г. А. Высоцкий и др. // Там же. — 1991. — № 3. — С. 76–80.
15. *Sheiko I. V., Latash Yu. V.* Induction Melting with an Ingot Formation in a Sectional Mould / Ed. by Institute E. O. Paton. — London, 1999. — 11, № 4. — 99 p.
16. *Электронно-лучевая плавка в литейном производстве* / С. В. Ладохин, Н. И. Левицкий, В. Б. Чернявский и др. — Киев: Сталь, 2007. — 627 с.
17. *Протоколов І. В.* Магнітокерування електрошлакова плавка багатоконпонентних титанових сплавів: Дис. ... канд. техн. наук / НАН України, Ін-т електроварування ім. Є. О. Патона. — Київ, 2006. — 178 с.
18. *Басин А. С., Шишкин А. В.* Получение кремниевых пластин для солнечной энергетики. Методы и технологии. — Новосибирск: ИТ СО РАН, 2000. — 196 с.
19. *Абдюханов И. М.* Разработка основ технологии производства металлургического кремния повышенной чистоты для наземной фотоэнергетики // Рос. хим. ж-л. — 2001. — 45, № 5-6. — С. 107–111.
20. *Солнечная энергетика и возможности индукционной гарнисажной плавки в холодном тигле для получения солнечного кремния* / А. В. Шкульков, Ю. В. Черпак, С. А. Пожируй и др. // Индукционный нагрев. — 2009. — № 3. — С. 16–19.
21. *Kaneko K., Misawa T., Tabata K.* Cold crucible induction casting of semiconductor silicon for solar cells // Photovoltaic Specialists conf. (21–25 May 1990, Kissimmee, FL, USA). — Kissimmee, 1990. — Vol. 1. — P. 674–677.
22. *Continuous pulling of photovoltaic silicon using an inductive cold crucible* / P. Ribeyron, A. Gagnoud, M. Anderhuber et al. // Proc. Intern. conf. Electromagnetic Processing of Materials UIE/EPM (June 6, Paris, 1997). — Paris, 1997. — Vol. 2. — P. 303–308.

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

Поступила 30.09.2011

Международная конференция «Ti-2012 в СНГ»

22–25 апреля 2012, г. Казань, Россия

18 ноября 2011 г. состоялось заседание Совета директоров ЗАО «Межгосударственная ассоциация «Титан».

Собрание проходило в ФГУП ВИАМ, г. Москва. Были рассмотрены вопросы текущей деятельности ассоциации, а также принято решение о проведении очередной ежегодной международной конференции «Ti-2012 в СНГ» с 22 по 25 апреля 2012 г. в г. Казань.

<http://www.titan-association.com>



ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА СВАРКИ НА СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СПЛАВАХ СИСТЕМЫ Ti-Si-X

С. В. Ахонин, М. П. Кругленко, И. К. Петриченко,
Э. Л. Вржижевский, Р. Н. Мищенко, Р. В. Селин

Рассматривается формирование структуры при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) опытных жаропрочных α -, псевдо α -, $\alpha+\beta$ -сплавов с массовыми долями кремния от 0,35 до 3,0 %. Несмотря на то, что в сплавах, отличающихся содержанием кремния, образуется неодинаковое количество частиц силицидов различных форм и размеров, обнаружены сходные тенденции в формировании структуры сварных соединений при ЭЛС. В участках зоны термического влияния (ЗТВ), где металл нагревался ниже температуры полиморфного превращения $T_{п.п}$ для всех сплавов зафиксированы строчечные скопления частиц силицидов, ориентированные вдоль проката. В участках ЗТВ, где металл нагревался выше $T_{п.п}$, можно отметить измельчение зерна не только в α -сплавах с высоким, но и в $\alpha+\beta$ -сплаве с низким содержанием кремния. В шве также можно обнаружить измельчение зерна как для α -сплавов с высоким содержанием кремния, так и для псевдо α -, $\alpha+\beta$ -сплавов с низким содержанием кремния. Таким образом, силициды кремния, содержащиеся в этих сплавах, способствуют измельчению зерна в металле шва и ЗТВ, блокируя границы растущих зерен силицидами и проявляя модифицирующий эффект.

Considered is the formation of structure in electron beam welding (EBW) of experimental heat-resistant α -, pseudo α -, $\alpha+\beta$ -alloys with mass fractions of silicon from 0.35 to 3.0 %. In spite of the fact that in alloys, different in silicon content, unequal amount of particles of silicides of different shapes and sizes are formed, the similar tendencies in formation of structure of welded joints in EBW were revealed. In areas of heat-affected zone (HAZ), where metal was heated below the temperature of a polymorphous transformation $T_{p.t}$ the line clusters of particles of silicides, oriented along the rolling, were observed for all the alloys. In HAZ areas, where metal was heated above $T_{p.t}$ the grain refinement can be observed not only in α -alloys with a high content of silicon, but also in $\alpha+\beta$ -alloy with a low content of silicon. In weld the grain refinement can be observed both for α -alloys with a high content of silicon, but also for pseudo α -, $\alpha+\beta$ -alloys with a low content of silicon. Thus, the silicon silicides, contained in these alloys, promote the grain refining in weld metal and HAZ, blocking the boundaries of growing grains by silicides and manifesting the modifying effect.

Ключевые слова: структурные превращения; силициды; термический цикл

Большинство жаропрочных титановых сплавов содержат кремний, являющийся наиболее эффективной добавкой для повышения длительной прочности и сопротивления ползучести. Даже небольшие отличия в содержании кремния и других элементов в промышленных жаропрочных сплавах Ti-1100, IMI-834, BT-18U приводят к получению разных свойств материалов и свариваемости.

В данной работе рассматривается формирование структуры при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) опытных жаропрочных α -, псевдо α -, $\alpha+\beta$ -сплавов с массовой долей кремния от 0,35 до 3,0 %. Химический состав опытных сплавов приведен в таблице.

Химический состав опытных сплавов										
№ сплава	Массовая доля элементов, %									
	Al	Sn	Zr	Mo	V	Nb	Si	[O+C+N]	[O]	[N]
1	—	—	—	—	—	—	3,38	0,17	—	—
2	—	—	3,41	—	—	—	2,23	0,22	—	—
3	1,40	2,87	5,95	—	—	—	3,37	0,16	—	—
4	5,64	2,20	3,53	0,43	0,95	—	0,56	—	0,09	0,02
5	5,22	3,33	4,24	0,13	0,61	0,77	0,57	—	0,10	0,02
6	4,29	4,39	5,95	1,57	0,68	4,26	0,35	—	0,24	0,02

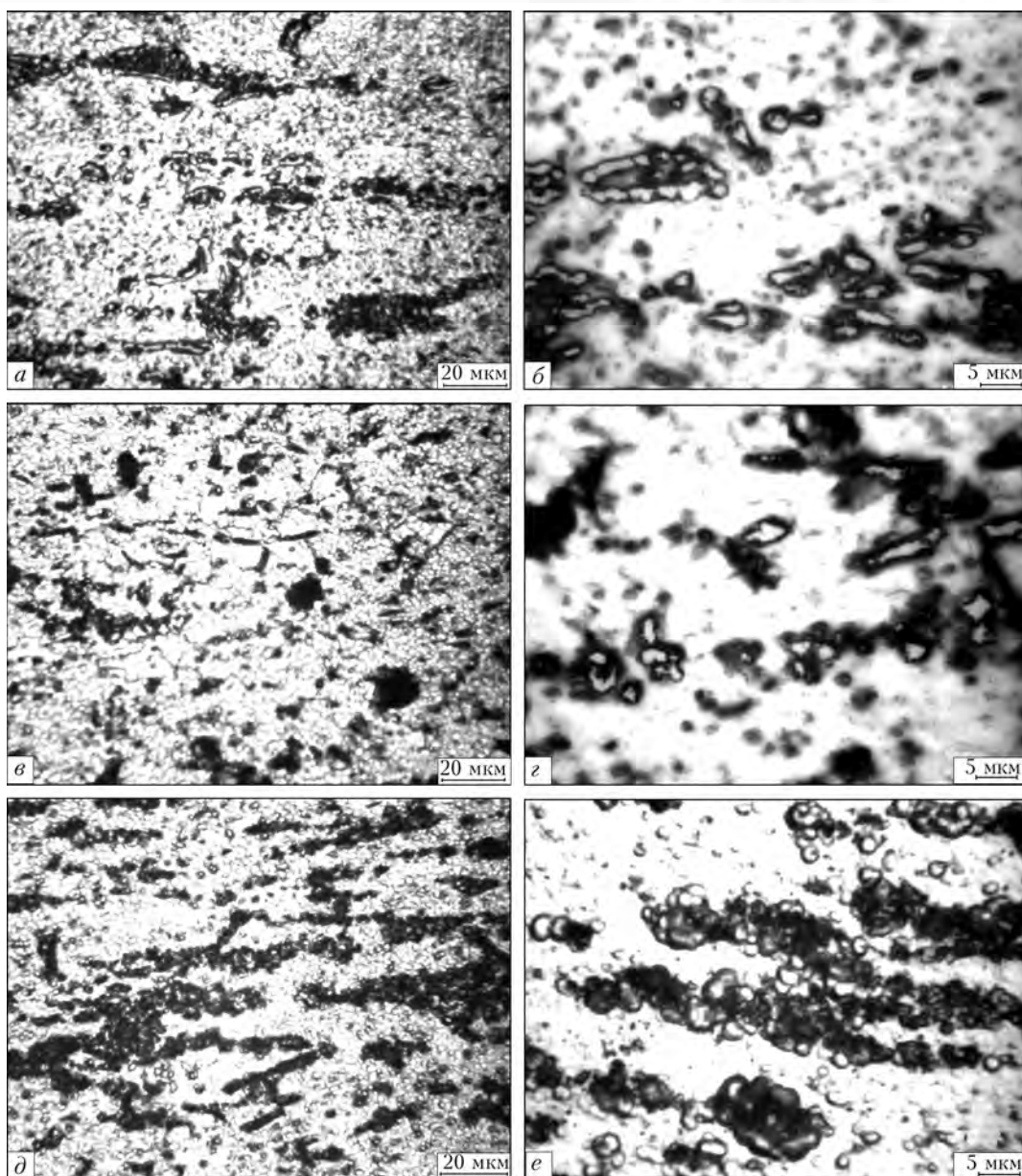


Рис. 1. Микроструктура ОМ сплавов Ti-3,4Si (а, б); Ti-3,4Zr-2,2Si (в, г); Ti-1,4Al-2,9Sn-6Zr-3,4Si (д, е)

Перед сваркой весь металл прокатали до толщин 6... 10 мм по стандартной методике и отожгли при 800 °С. Сварку проводили по режиму ($U_{св} = 60$ кВ, $I_{св} = 80$ мА, $v_{св} = 7$ мм/с), который является оптимальным с точки зрения предотвращения холодных трещин при сварке. При этом шов имел цилиндрическую форму.

Титановые α -сплавы Ti-3,4Si (№ 1), Ti-3,4Zr-2,2Si (№ 2), Ti-1,4Al-2,9Sn-6Zr-3,4Si (№ 3) с массовой долей кремния, превышающей термодинамически стабильное содержание, разработаны в Институте проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины для рабочих температур 20... 700 °С [1]. Эти α -сплавы имеют идентичные структуры не только основного металла (ОМ), но и сварных соединений в металле шва и зоны термического влияния (ЗТВ). В ОМ в α -матрице содержатся как равномерно распределенные точечные частицы силицидов, так и частицы силицидов более

крупного размера, расположенные в виде строчек, ориентированных вдоль направления проката (рис. 1). Все три сплава содержат примерно одинаковое количество точечных частиц размером менее 1,5 мкм. Наименьшее количество скоплений крупных частиц, достигающих 20 мкм, обнаружено в сплаве № 2 (рис. 1, в, г). Наибольшее количество скоплений зафиксировано в сплаве № 3 (рис. 1, д, е). Частицы, их составляющие, наиболее мелкие (3... 5 мкм) и правильной круглой формы.

Следует также отметить, что если в сплаве Ti-3,4Si силицидные частицы состоят только из Ti_5Si_3 , то остальные пять сплавов содержат цирконий и в них образуются сложные силициды с составом $(Ti, Zr)_xSi$, где x колеблется в пределах 1,67... 2,00 [2, 3].

Металл сварных швов α -сплавов Ti-3,4Si, Ti-3,4Zr-2,2Si, Ti-1,4Al-2,9Sn-6Zr-3,4Si имеет дендритную структуру (рис. 2). В междендритных про-

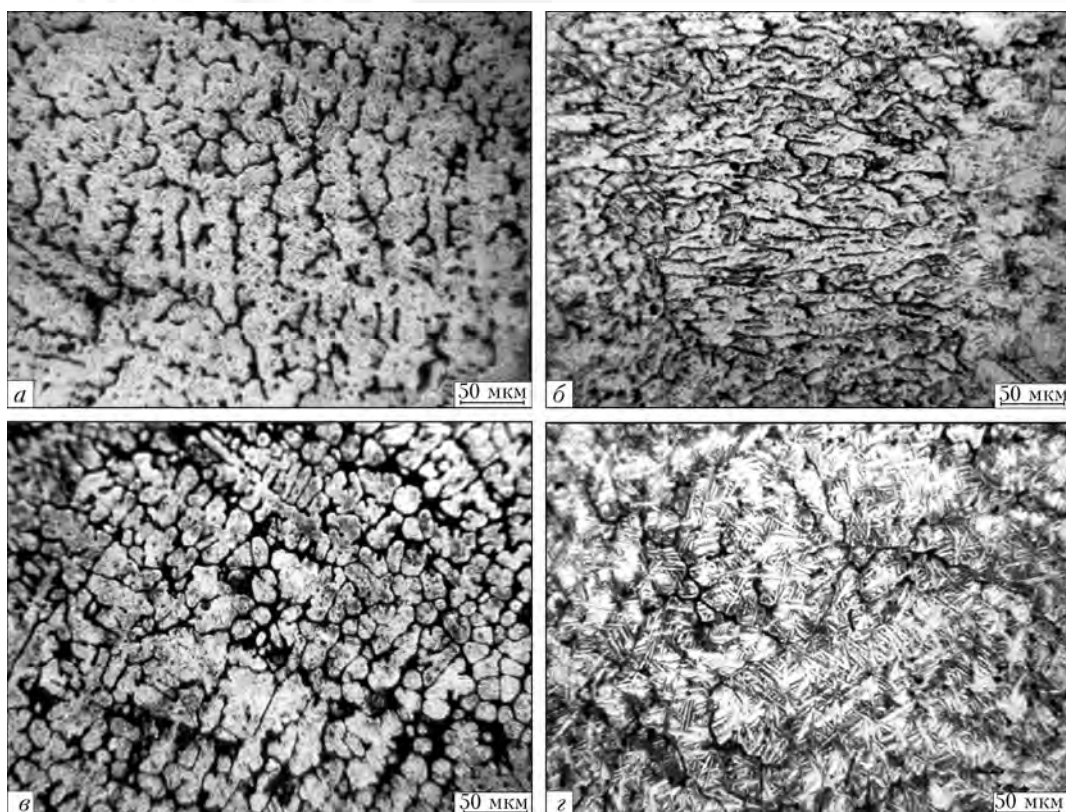


Рис. 2. Микроструктура металла шва α -сплавов Ti-3,4Si (а); Ti-1,4Al-2,9Sn-6Zr-3,4Si (б, в); Ti-3,4Zr-2,2Si (г)

межутках располагаются силициды (темная фаза). После охлаждения металла шва ниже температуры полиморфного превращения $T_{\text{п.п}}$ происходит $\beta \rightarrow \alpha'$ -превращение с образованием игольчатой структуры на фоне дендритов. В некоторых участках шва спла-

ва Ti-3,4Si отмечены единичные мелкие равноосные зерна размером 0,02... 0,03 мм, окруженные силицидами (рис. 2, а). В сплаве Ti-1,4Al-2,9Sn-6Zr-3,4Si таких зерен имеется большое количество (рис. 2, б). В сплаве Ti-3,4Zr-2,2Si в центральной

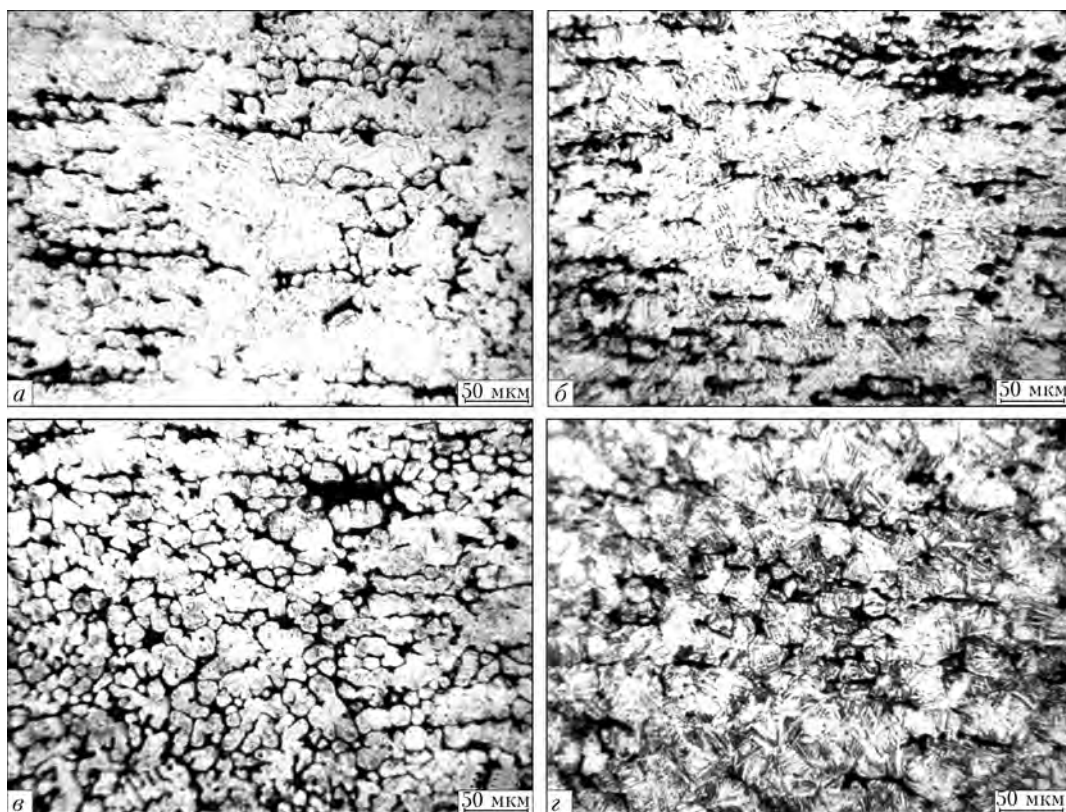


Рис. 3. Микроструктура металла ЗТВ в околошовном участке α -сплавов Ti-3,4Si (а); Ti-3,4Zr-2,2Si (б); Ti-1,4Al-2,9Sn-6Zr-3,4Si (в, г)

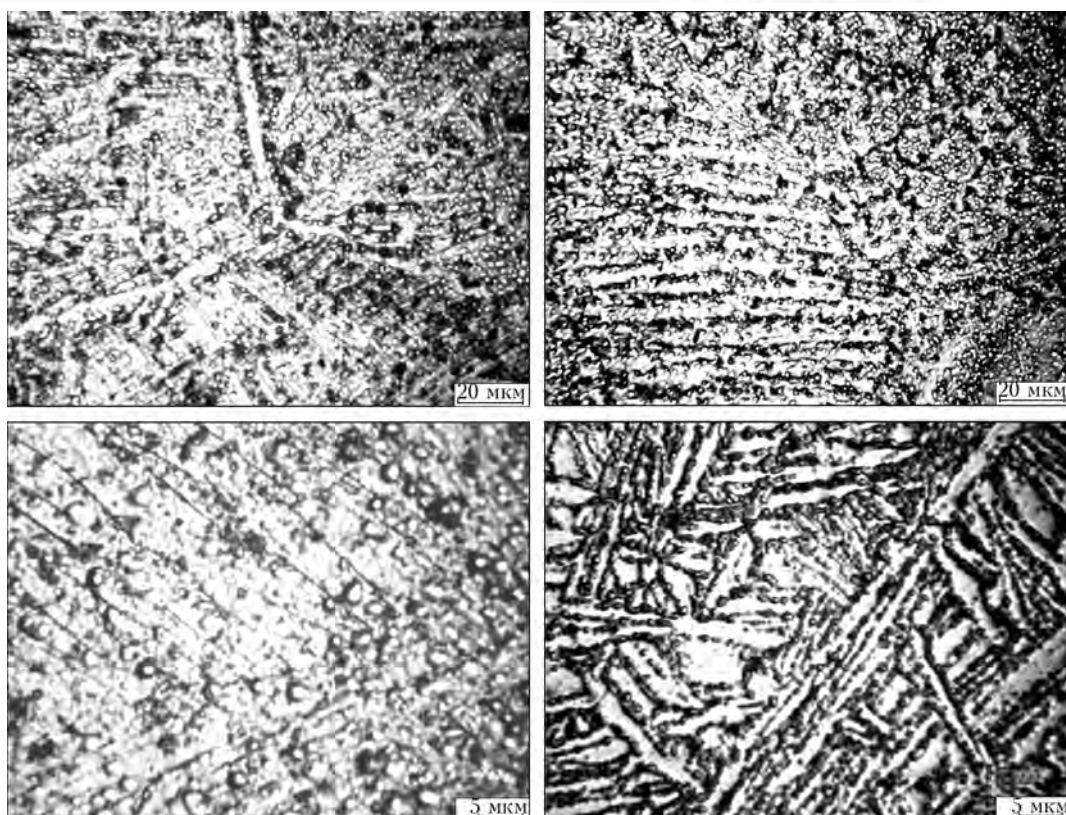


Рис. 4. Микроструктура ОМ сплавов Ti-5, 6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1V-0,6Si (а, б, в); Ti-5,2Al-3,3Sn-4,2Zr-0,1Mo-0,6V-0,8Nb-0,6Si (б)

части шва обнаружены вытянутые небольшие зерна, которые росли от зоны сплавления перпендикулярно оси шва (рис. 2, б). Отжиг сварных соединений при 800 °С в течение 1 ч приводит к обра-

зованию более четко выраженной пластинчатой структуры металла шва для трех сплавов (рис. 2, в).

В металле ЗТВ происходят перераспределение и коагуляция силицидов, зависящие от температуры, до которой нагревался участок ЗТВ в ходе свар-

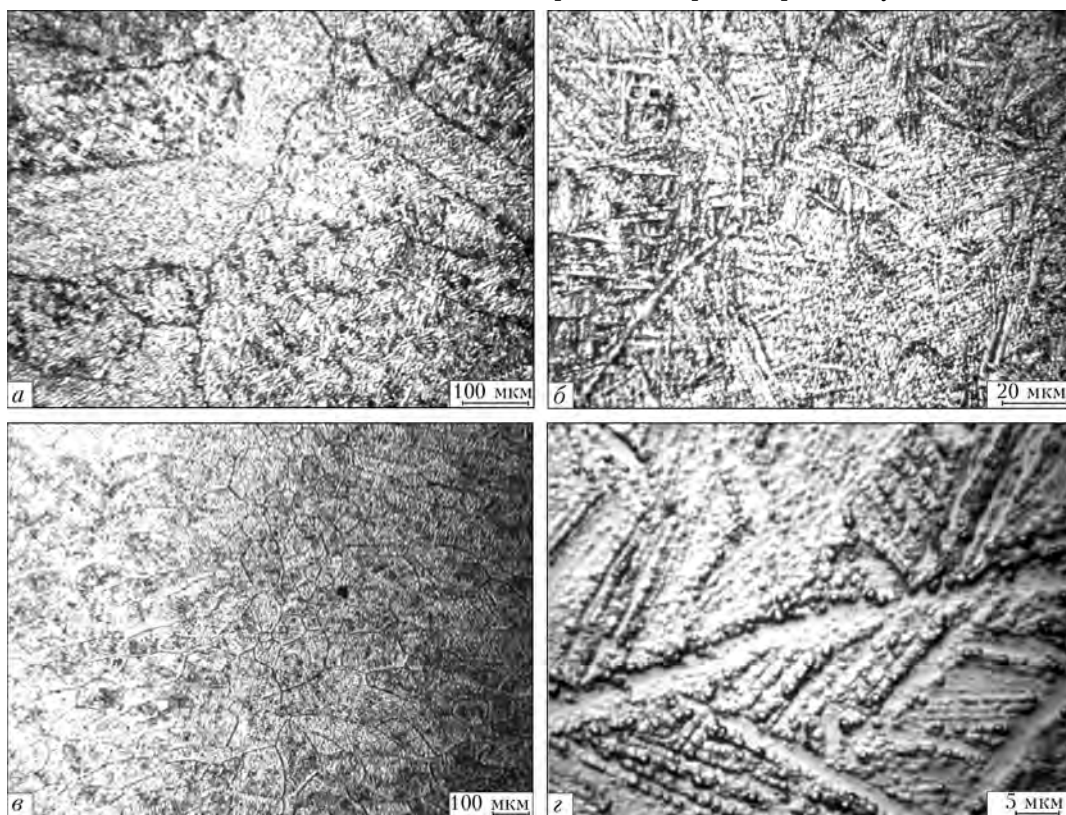


Рис. 5. Микроструктура металла шва сплава Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1V-0,6Si (а, б); Ti-5,2Al-3,3Sn-4,2Zr-0,1Mo-0,6V-0,8Nb-0,6Si (в, г)

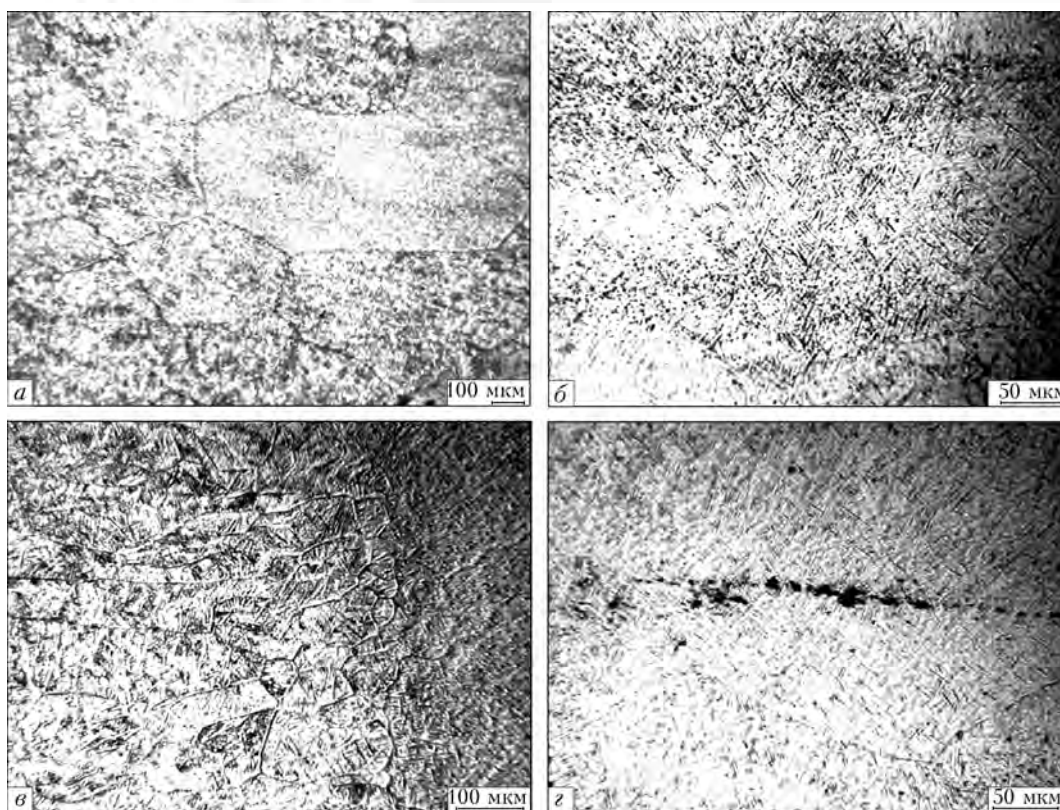


Рис. 6. Микроструктура ЗТВ сплавов Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1V-0,6Si (а, б); Ti-5,2Al-3,3Sn-4,2Zr-0,1Mo-0,6V-0,8Nb-0,6Si (в, г)

ки. При нагреве до температур ниже $T_{п.п}$ по мере удаления от ОМ плотность дисперсных точечных выделений силицидов уменьшается, в то время как размер образующих строчки частиц увеличивается, по сравнению с таковыми в ОМ.

В случае нагрева металла до температур, превышающих $T_{п.п}$, дисперсные точечные выделения силицидов в объеме зерен минимальны и располагаются в основном в виде строчек, вытянутых в направлении, совпадающем с направлением прокатки основного металла. В металле околосшовного участка ЗТВ отмечено образование групп мелких равноосных зерен размером 0,02... 0,03 мм (рис. 3).

По мере приближения к шву происходит увеличение степени измельчения зерна, в отличие от сварных соединений большинства титановых сплавов, где максимальный размер зерна в металле ЗТВ зафиксирован вблизи зоны сплавления [4].

Из трех сплавов наименьшая степень измельчения зерна обнаружена в сплаве Ti-3,4Zr-2,2Si (рис. 3, в), наибольшая — в сплаве Ti-1,4Al-2,9Sn-6Zr-3,4Si (рис. 3, б). При остывании металла ЗТВ, нагретого до температур β -области, при температуре ниже $T_{п.п}$ происходит $\beta \rightarrow \alpha'$ -превращение с образованием игольчатой α' -фазы, как и в шве. После отжига сварных соединений в металле ЗТВ, аналогично металлу шва, более четко выражается пластинчатая структура (рис. 3, г).

Таким образом, силициды кремния, содержащиеся в этих сплавах, способствуют измельчению зерна в металле шва, особенно в ЗТВ, блокируя гра-

ницы растущих зерен силицидами и проявляя модифицирующий эффект.

Сплавы Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1V-0,6Si (№ 4), Ti-5,2Al-3,3Sn-4,2Zr-0,1Mo-0,6V-0,8Nb-0,6Si (5) относятся к группе псевдо α -сплавов титана.

Коэффициент стабилизации β -фазы k_β для сплава № 4 составляет 0,1, для сплава № 5 — 0,07. Сплав Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1V-0,6Si отличается от сплава Ti-1100 наличием небольшой добавки ванадия (0,95 мас. %), сплав Ti-5,2Al-3,3Sn-4,2Zr-0,1Mo-0,6V-0,8Nb-0,6Si от сплава IMI-834 — массовыми долями алюминия на 0,28 и молибдена на 0,12 % ниже минимальных значений, а также наличием ванадия (0,61 %).

В состоянии после проката сплавы № 4 и 5 имеют пластинчатую структуру, в которой частицы силицидов размещены довольно равномерно в границах первичных β -зерен (рис. 4, а-в). После отжига дисперсные частицы силицидов расположены в основном вдоль границ α -пластин (рис. 4, г).

Микроструктура металла шва сплава Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1V-0,6Si состоит из вытянутых в направлении теплоотвода первичных β -зерен с пластинчатой α' -фазой в объеме зерен. После сварки частицы силицидов хаотически локализуются как по границам β -зерен, так и в объеме зерен (рис. 5, а, б).

Сплав Ti-5,2Al-3,3Sn-4,2Zr-0,1Mo-0,6V-0,8Nb-0,6Si также состоит из вытянутых в направлении теплоотвода первичных β -зерен с пластинчатой α' -фазой в объеме зерен. Однако в нем вдоль оси шва образуются равноосные зерна (рис. 5, в). После отжига этих псевдо α -сплавов титана частицы си-

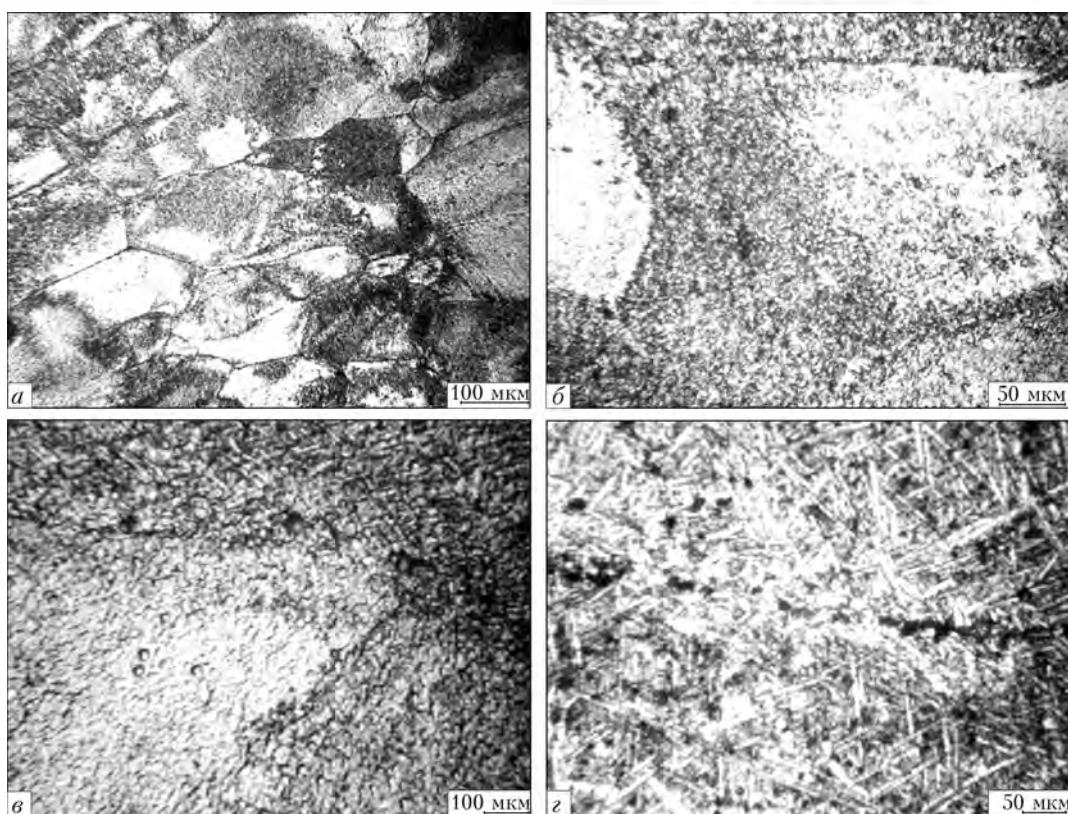


Рис. 7. Микроструктура опытного сплава Ti-4,3Al-4,4Sn-6Zr-1,6Mo-0,7V-4,3Nb-0,4Si (здесь и на рис. 8, 9 обозн. *a–г* см. в тексте)

лицидов локализуются в основном на границах α -пластин либо первичных β -зерен (рис. 5, *г*).

Микроструктуры металла ЗТВ сварных соединений опытных сплавов Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1V-0,6Si и Ti-5,2Al-3,3Sn-4,2Zr-0,1Mo-0,6V-0,8Nb-

-0,6Si не отличаются. В металле околосшовной зоны ЗТВ после нагрева до температур выше $T_{п.п}$ образуются большие равноосные β -зерна (рис. 6, *a*).

При охлаждении до температур ниже $T_{п.п}$ в объеме первичных β -зерен, как и в металле шва,

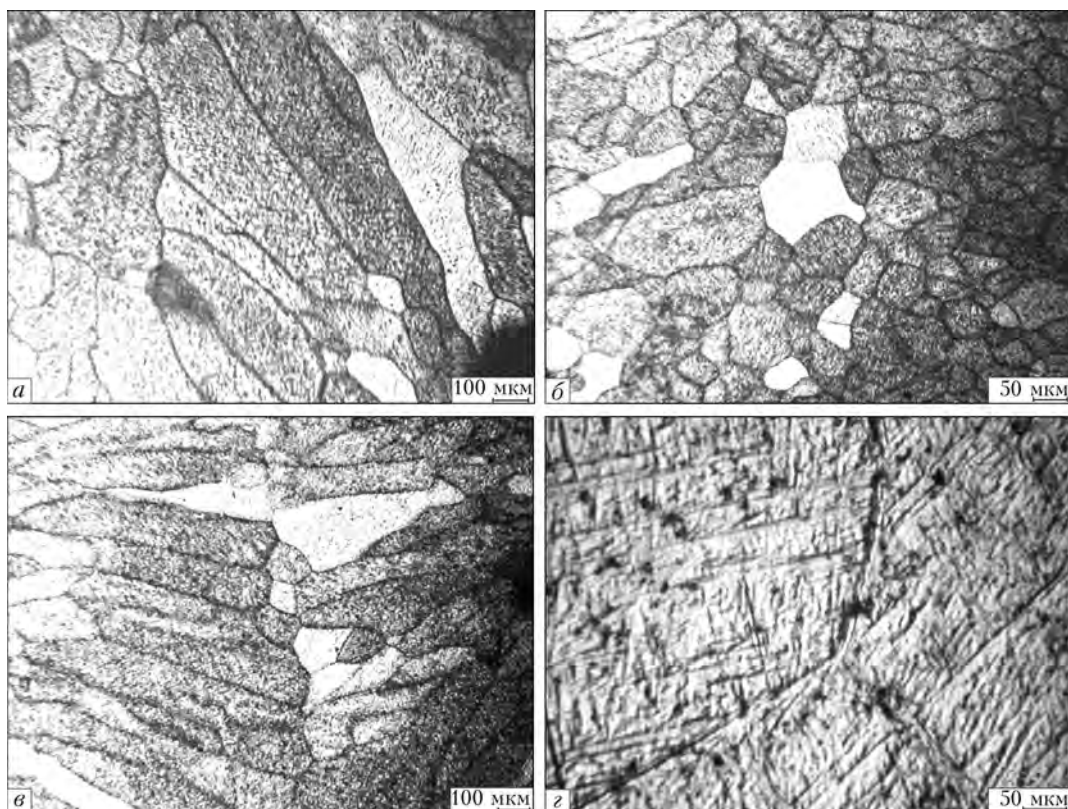


Рис. 8. Микроструктура металла шва сварного соединения сплава Ti-4,3Al-4,4Sn-6Zr-1,6Mo-0,7V-4,3Nb-0,4Si

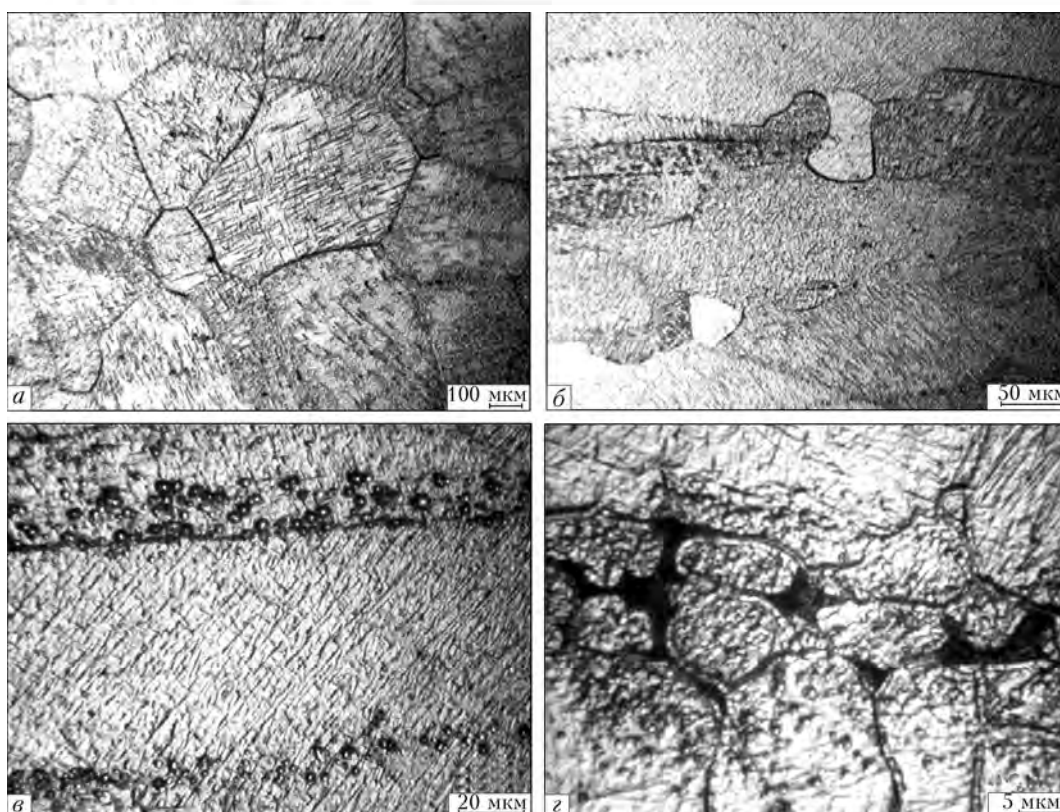


Рис. 9. Микроструктура ЗТВ сварного соединения сплава Ti-4,3Al-4,4Sn-6Zr-1,6Mo-0,7V-4,3Nb-0,4Si

происходит $\beta \rightarrow \alpha'$ -превращение с образованием пластинчатой α' -фазы, которая по своим свойствам подобна α -фазе. В участке металла ЗТВ, который нагревался до температур ниже $T_{\text{п.п}}$, тоже обнаружена пластинчатая α' -фаза. В ЗТВ видны полосы точечных выделений силицидов, вытянутые в направлении проката металла перпендикулярно шву (рис. 6, б, г). После отжига силициды, как правило, декорируют границы α -пластин.

В этих псевдо α -сплавах титана размер и количество образовавшихся силицидов способствуют проявлению модифицирующего эффекта и сдерживанию роста β -зерен в металле шва и околошовной зоны, как зафиксировано в α -сплавах с большим количеством кремния. Однако в сплаве Ti-5,2Al-3,3Sn-4,2Zr-0,1Mo-0,6V-0,8Nb-0,6Si вдоль оси шва все же образуются небольшие равноосные β -зерна (рис. 6, в).

Сплав Ti-4,3Al-4,4Sn-6Zr-1,6Mo-0,7V-4,3Nb-0,4Si (№ 6) относится к титановым $\alpha+\beta$ -сплавам мартенситного типа, его k_{β} равен 0,31. Микроструктура сплава изображена на рис. 7. После проката происходит дробление и глобуляризация пластинчатой структуры (рис. 7, а-в), а после отжига снова формируется тонкая пластинчатая структура (рис. 7, г). В направлении вдоль проката отмечены строчечные выделения очень мелкодисперсных частиц силицидов [5] несмотря на то, что содержание кремния в этом сплаве находится в пределах его растворимости в α -фазе. Алюминий понижает и без того невысокую растворимость кремния в α -титане [6].

Металл сварного шва опытного сплава Ti-4,3Al-4,4Sn-6Zr-1,6Mo-0,7V-4,3Nb-0,4Si состоит из первичных β -зерен разной формы. В верхней части шва формируются наиболее крупные зерна, вытянутые в направлении теплоотвода под углом 45...60° к оси шва (рис. 8, а). В средней части практически на всю ширину шва формируются равноосные полиэдрические зерна, значительно мельче, чем в верхней части шва (рис. 8, б). Ближе к корню шва вытянутые зерна срастаются под углом примерно 180° (рис. 8, в). На форму и размер первичных β -зерен значительно влияет режим сварки. В объеме первичных зерен фиксируется метастабильная мартенситная β' -фаза. На фоне игольчатой структуры заметны очень мелкодисперсные частицы силицидов, которые размещаются как на границах, так и в объеме зерна (рис. 8, г).

В металле ЗТВ сварного соединения сплава Ti-4,3Al-4,4Sn-6Zr-1,6Mo-0,7V-4,3Nb-0,4Si можно выделить три структурно отличных участка. Околошовная зона состоит из равноосных полиэдрических первичных β -зерен с игольчатой морфологией внутризеренной α' -фазы (рис. 9, а). Дальше от шва размещен участок ЗТВ, где произошла частичная рекристаллизация с образованием мелких равноосных зерен (рис. 9, б). Рядом с ОМ находится участок ЗТВ, который нагревался до температур, ниже чем $T_{\text{п.п}}$ и температуры рекристаллизации, и наследовал структуру ОМ. Во втором и третьем участках ЗТВ обнаружены полосы точечных образований силицидов (рис. 9, в).



Следует отметить, что именно такие полосы являются местом образования мелких равноосных зерен. Подобные структуры отмечены в сплавах с высоким содержанием кремния. В некоторых локальных местах ЗТВ образованные мелкие равноосные зерна окружены эвтектикой (рис. 9, з).

Таким образом, несмотря на то, что в сплавах разных типов с отличающимся содержанием кремния образуется разное количество частиц силицидов различной формы и размеров, все же отмечаются сходные тенденции в формировании структуры сварных соединений при ЭЛС. В участках ЗТВ, где металл нагревался ниже температуры полиморфного превращения $T_{п.п.}$, для всех сплавов обнаружены строчечные скопления частиц силицидов, ориентированные вдоль проката. В участках ЗТВ, где металл нагревался выше $T_{п.п.}$, можно зафиксировать измельчение зерна не только в α -сплавах с высоким, но и в $\alpha+\beta$ -сплаве с низким содержанием кремния. В металле шва также можно обнаружить измельчение зерна как для α -сплавов с высоким содержанием кремния, так и для псевдо α -, $\alpha+\beta$ -сплавов с низким содержанием кремния. Таким образом, си-

лициды кремния, содержащиеся в этих сплавах, способствуют измельчению зерна в металле шва и ЗТВ, блокируя границы растущих зерен и проявляя модифицирующий эффект.

1. *Structure and mechanical properties of Ti-Si-X in-situ composites* / S. Firstov, M. Kuzmenko, O. Koval, O. Vasylyev // Intern. conf. «Science for Materials in the Frontier of Centuries: Advantages and Challenges» (Kyiv, Ukraine, 2002). — Kyiv, 2002. — P. 623–624.
2. Аношкин Н. Ф., Сигалов Ю. М. Титановые сплавы с повышенной жаропрочностью // Технология легких сплавов. — 2002. — № 1. — С. 38–50.
3. Singh A. K., Ramachandra C. Characterization of silicides in high-temperature titanium alloys // J. of materials science. — 1997. — № 32. — P. 229–234.
4. Грабин В. Ф. Основы металловедения и термической обработки сварных соединений из титановых сплавов. — Киев: Наук. думка, 1975. — 264 с.
5. Исследование структуры и механических свойств сплава Ti-7,2Al-2,9Mo-2,7W-3Nb-2,3Zr-0,4Si / С. А. Фирстов, В. Н. Замков, Н. П. Бродниковский и др. // Общие вопросы металлургии. — 2006. — № 2. — С. 33–38.
6. Корнилов И. И., Будберг П. Б. Диаграммы состояния двойных и тройных систем. — М.: ВИНТИ, 1961. — С. 78–81.

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

Поступила 05.07.2011

НОВАЯ КНИГА

Welding and Allied Processes.

A series of books and monographs on welding, cutting, surfacing, brazing, coating deposition and other processes of metal treatment.

Edited by Prof. B.E. Paton, E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

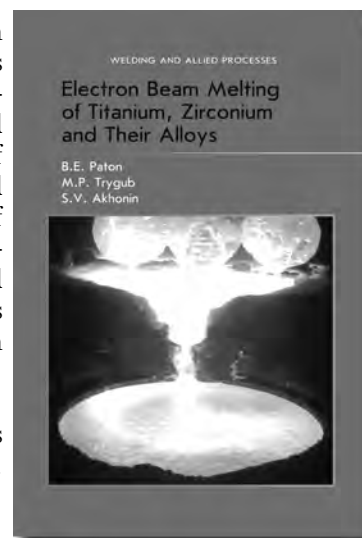
Electron Beam Melting of Titanium, Zirconium and Their Alloys

B.E. Paton, M.P. Trygub and S.V. Akhonin

The book considers peculiarities of metallurgical production of titanium and zirconium ingots by the electron beam melting method. Mechanisms and patterns of behaviour of impurities, non-metallic inclusions and alloying elements during the process of electron beam melting of titanium and zirconium are detailed. Optimal technological parameters for melting of high-reactivity metals are suggested, providing high quality, technical and economic indices of this metallurgical process. Quality characteristics of the resulting ingots, including their chemical composition, micro- and macrostructure, as well as some mechanical properties of metal in the cast and wrought states, are given. Flow diagrams of melting and glazing of surfaces of the ingot are presented, and specific features of designs of electron beam units are described.

The book is meant for scientists, engineers and technicians, as well as for students of metallurgical departments of institutes of higher education.

*Заказы на книгу (216 стр., формат 165Х240 мм, твердый переплет)
просьба направлять в редакцию журнала*





УДК 669.187.2

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА ПОСЛЕ ЗОННОЙ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Н. В. Пискун, И. Л. Богайчук, Е. А. Аснис,
Г. М. Григоренко, И. И. Статкевич, В. В. Лакомский,
В. А. Костин, Р. В. Козин, В. А. Березос

Исследовано влияние зонной перекристаллизации интерметаллидного сплава системы Ti–Al–Nb–Zr–Cr на его структуру и некоторые механические характеристики. Установлено, что зонный переплав способствует обеспечению направленной кристаллизации, уменьшению размера зерна интерметаллида, снижению его твердости и более равномерному ее распределению по сечению и объему слитка, в сравнении с интерметаллидом, полученным способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью. Эти структурные изменения приводят к повышению прочности и пластичности интерметаллида.

The effect of zonal recrystallization of intermetallic alloy of Ti–Al–Nb–Zr–Cr system on structure and some mechanical characteristics of the alloy was investigated. It was found that the zonal remelting promotes the formation of directed crystallization, decrease in size of intermetallic grain, reduction in its hardness and more uniform its distribution in section and volume of ingot as compared with intermetallic, produced by the method of electron beam cold hearth melting (EBCHM). These structural changes lead to the increase in strength and ductility of intermetallic.

Ключевые слова: интерметаллид; алюминид титана; зонная перекристаллизация; направленная кристаллизация; структура; механические характеристики

Интерметаллидные сплавы системы Ti–Al отличаются уникальными конструкционными свойствами и считаются весьма перспективными для изделий аэрокосмической техники. Кроме высоких значений жаропрочности, жаростойкости и коррозионной стойкости, эти сплавы имеют низкую плотность (3,8... 4,0 г/см³), что позволяет удовлетворить одно

из наиболее важных требований к изделиям аэрокосмической техники — значительно уменьшить массу конструкций.

Основным недостатком указанных сплавов считают низкую пластичность при комнатной температуре, что усложняет их технологическую обработку и промышленное использование. Поэтому создание сплавов системы Ti–Al и способов их получения с наилучшим сочетанием высокотемпературных и низкотемпературных свойств является весьма важной задачей.

Механические свойства алюминидов титана в значительной степени определяются их составом и структурой.

В данной работе исследовали структуру и некоторые механические свойства интерметаллидного сплава системы Ti–Al следующего состава, мас. %: Ti — 46,5; Al — 35; Nb — 12,5; Zr — 3; Cr — 3, разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона и полученного способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) [1].

На рис. 1 приведена микроструктура исходного материала, выплавленного способом ЭЛПЕ, которая состоит из крупных, слегка вытянутых зерен, не имеющих четкого очертания границ. Размер зерна равен 40... 45 мкм. В теле зерна зафиксирована

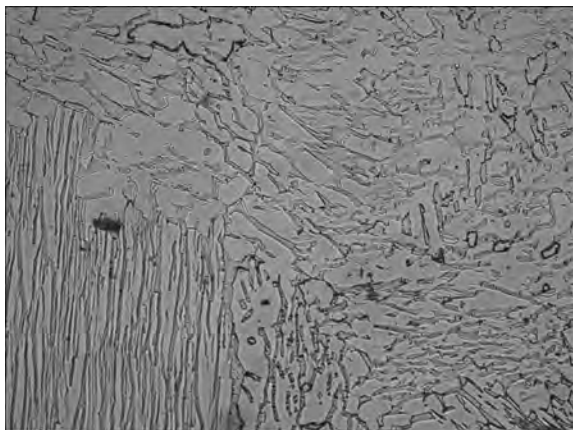


Рис. 1. Микроструктура (×320) интерметаллида после ЭЛПЕ

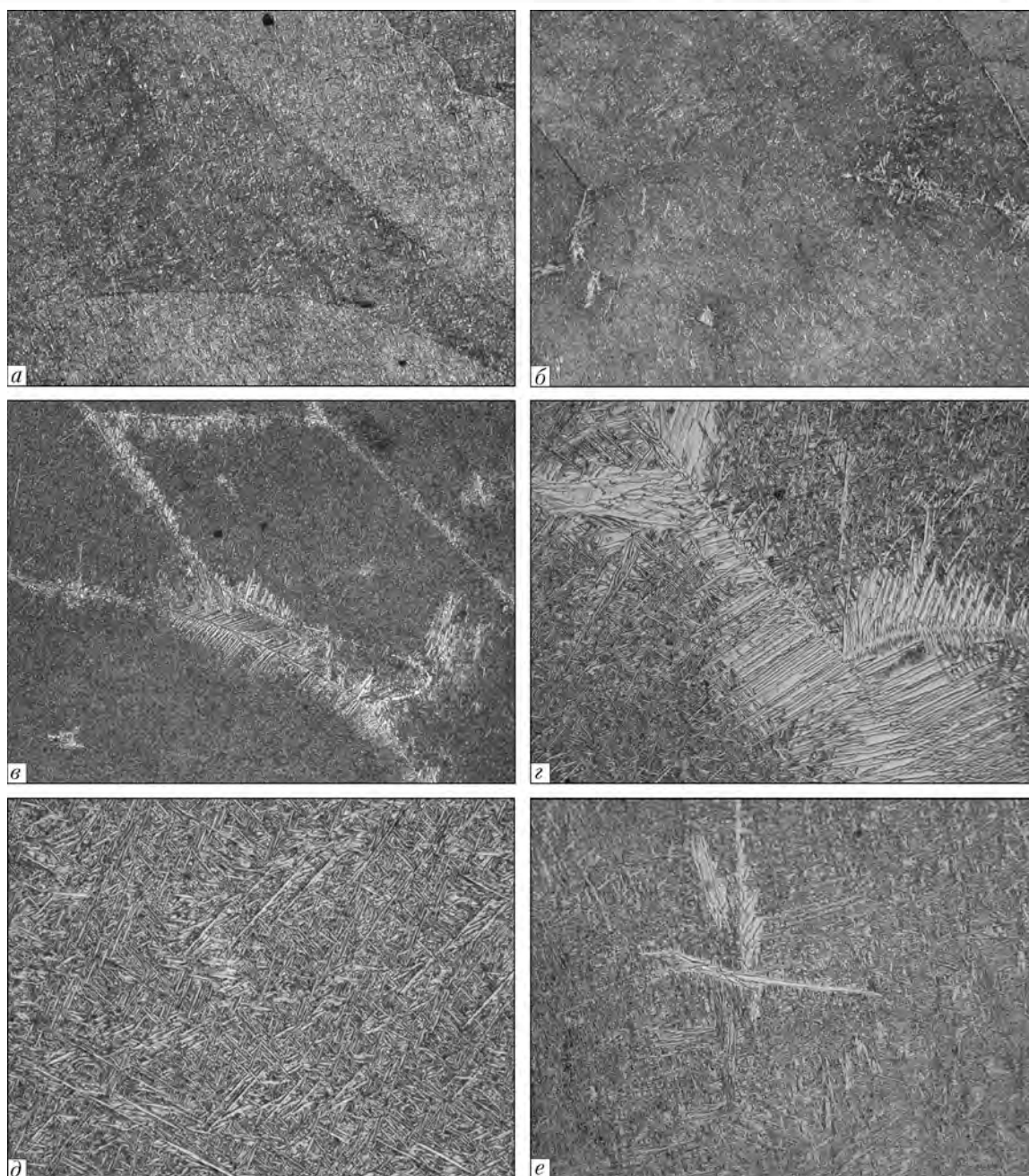


Рис. 2. Микроструктура интерметаллида после зонной перекристаллизации: *a* — начало, $\times 80$; *б* — середина, $\times 80$; *в* — конец процесса плавки, $\times 80$; *г* — фрагмент зерна с мартенситоподобными иглами, $\times 320$; *д* — трехфазная структура внутри зерна, $\times 500$; *е* — участок зерна с выделениями β - и γ -фазы, $\times 320$

ламельная структура γ -фазы и мелкая игольчатая α_2 -фазы. Твердость интерметаллида измеряли на приборе «Лесо» при нагрузке 25 г. Твердость матрицы зерна изменялась от 2370 до 3110 МПа. Участки с выделениями игольчатой фазы, которая по диаграмме состояния идентифицируется как $\gamma + \alpha_2$, имеют более высокое значение твердости (от 5140 до 6270 МПа).

На последующем этапе работы сплав подвергали зонной перекристаллизации. Применение зонной плавки дает возможность обеспечить направленную кристаллизацию [2]. В случае правильно подобранной технологии плавки фронт кристаллизации приближается к плоскому. При этом обеспечивается более равномерное распределение примесей по се-

чению и объему слитка, а также снижается уровень напряженного состояния и, соответственно, повышается пластичность материала.

Микроструктура образца после зонного переплава (рис. 2) состоит из вытянутых в одном направлении зерен со средним размером 31,5 мкм, которые также имеют внутреннюю ламельную структуру, состоящую из $(\gamma + \alpha_2)$ пластинчатых колоний. В центре образца (рис. 2, *a*) границы между зернами тонкие и имеют толщину 2 мкм. Чем ближе зона продвигается к верхней части образца, тем обнаруживается большее утолщение границ зерен (рис. 2, *б*), вдоль которых появляются выделения светлых слоев β -фазы с располагающимися на них крупными грубыми игольчатыми выделениями γ -фазы,

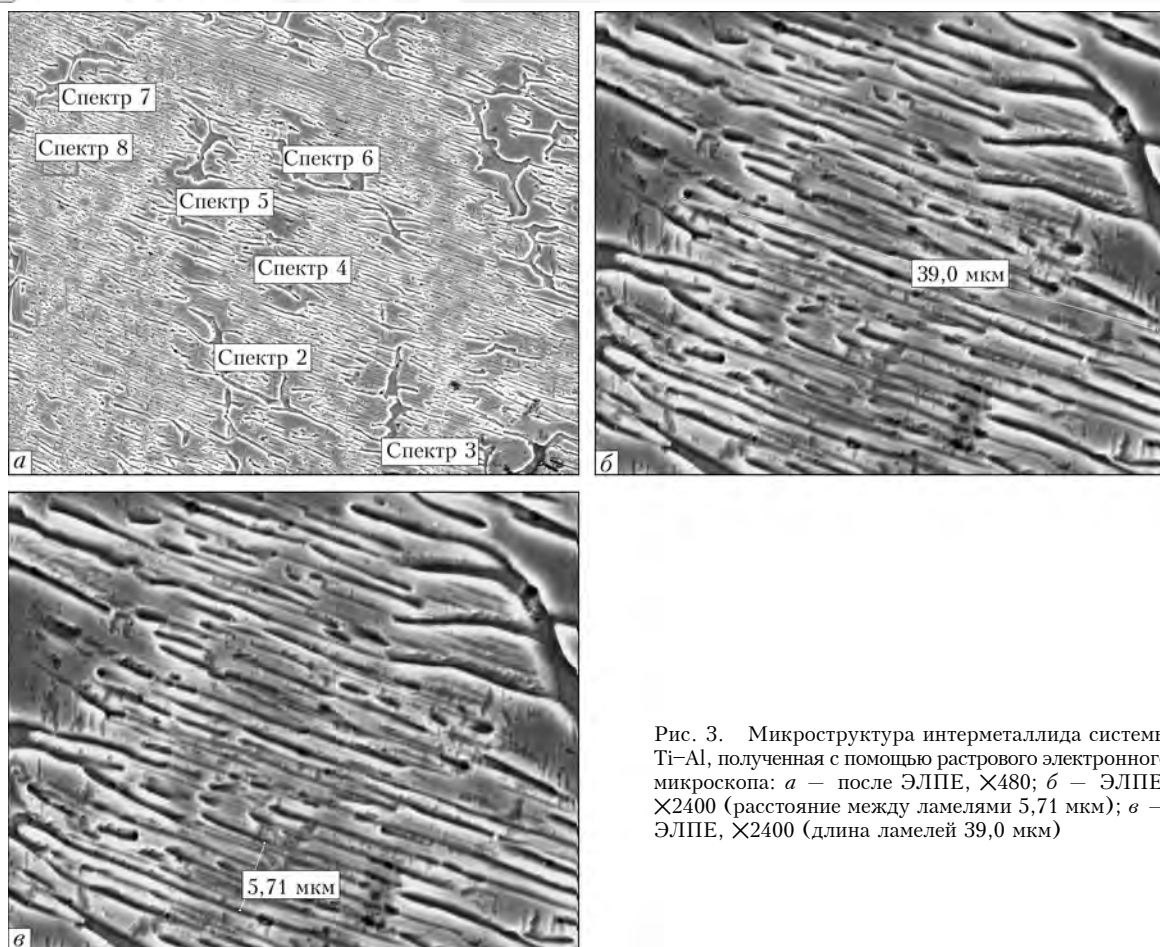


Рис. 3. Микроструктура интерметаллида системы Ti–Al, полученная с помощью растрового электронного микроскопа: а — после ЭЛПЕ, $\times 480$; б — ЭЛПЕ, $\times 2400$ (расстояние между ламелями 5,71 мкм); в — ЭЛПЕ, $\times 2400$ (длина ламелей 39,0 мкм)

прорастающими от границы в глубь образца. К моменту завершения процесса плавки толщина границ зерен с крупными мартенситоподобными иглами на светлой матрице (рис. 2, в) составляет 5...12 мкм. Фрагмент указанной структуры представлен на рис. 2, г. Внутри зерна в конце плавки появляется трехфазная структура (рис. 2, д) [3], представляющая собой β -фазу с грубыми иглами, γ -фазу и мелкодисперсные частицы α_2 -фазы.

Таблица 1. Химический состав сплава алюминид титана после ЭЛПЕ, определенный методом количественного микрорентгеноспектрального анализа в различных точках исследуемого образца

№ спектра	Массовая доля элементов, %				
	Al	Ti	Cr	Zr	Nb
2	18,40	59,71	8,89	1,56	11,45
3	22,18	59,92	4,59	3,21	10,09
4	30,17	52,57	1,74	3,98	11,55
5	29,96	51,88	2,06	5,05	11,05
6	19,89	59,44	8,90	1,13	10,65
7	27,07	56,10	2,72	3,71	10,39
8	29,63	55,86	2,61	2,89	9,02

Кроме того, внутри некоторых зерен встречаются участки светлых выделений β -фазы с грубыми γ -иглами (рис. 2, е).

Исследовали распределение твердости на образцах интерметаллида после зонной перекристаллизации. Результаты исследования показали, что твердость, которую замеряли с шагом 1 мм вдоль шлифа, стабильна и в среднем составляет 4640 МПа, причем и внутри зерна, и на границе она одинакова. Это почти на 20 % меньше, чем у сплава, выплавленного способом ЭЛПЕ.

Проведено исследование на электронном растровом микроскопе JSM-840 и выполнен микрорентгеноспектральный анализ образцов в исходном состоянии после ЭЛПЕ и последующей зонной перекристаллизации.

На рис. 3, а представлена микроструктура данного сплава. В некоторых, наиболее характерных, точках проведен количественный микрорентгеноспектральный анализ (табл. 1). Из результатов анализа видно, что светлые области обогащены ниобием, который является β -стабилизатором [4]. Таким образом, можно предположить, что светлая фаза является β -фазой. Также определена средняя длина ламелей — 39,0 мкм (рис. 3, б) и расстояние между ними — 5,7 мкм (рис. 3, в).

На рис. 4, а представлена микроструктура образцов интерметаллида, подвергнутых зонной перекристаллизации. Из рисунка видно, что после

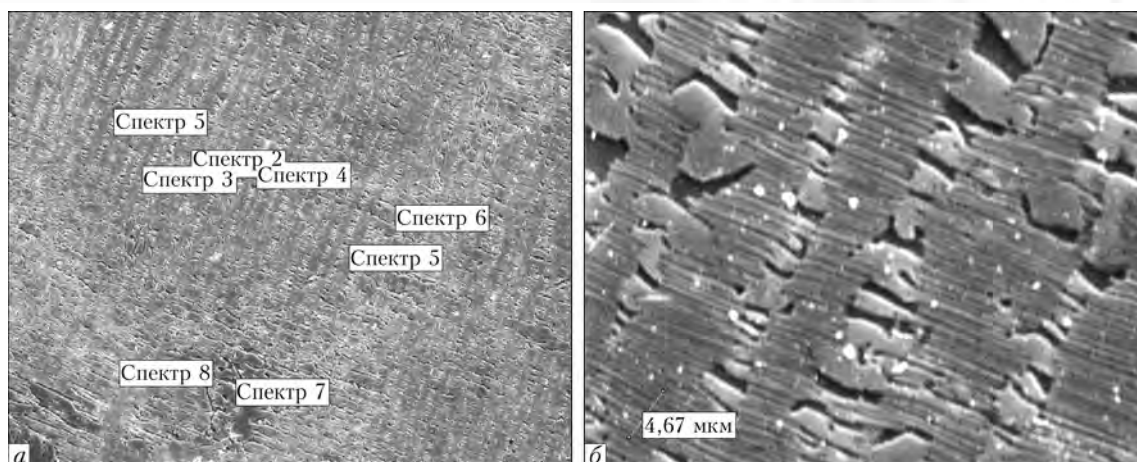


Рис. 4. Микроструктура интерметаллида Ti–Al после зонной перекристаллизации: а — $\times 480$ (растровый электронный микроскоп); б — $\times 2400$ (растровый электронный микроскоп; расстояние между ламелями 4,67 мкм)

Таблица 2. Химический состав сплава алюминид титана после зонной перекристаллизации, определенный методом количественного микрорентгеноспектрального анализа в различных точках исследуемого образца

№ спектра	Массовая доля элементов, %				
	Al	Ti	Cr	Zr	Nb
1	29,81	52,81	1,66	3,62	12,10
2	28,36	54,68	2,64	3,01	11,31
3	26,46	54,77	4,22	2,76	11,79
4	28,07	55,60	2,11	2,50	11,71
5	27,88	53,27	2,68	3,09	13,09
6	27,84	55,76	2,56	3,40	10,43
7	23,51	55,97	6,23	4,36	9,94
8	25,70	55,46	4,00	3,59	11,25

зонного переплава получается структура, вытянутая в сторону движения зоны, что должно способствовать повышению пластичности материала [5]. Распределение элементов по полю образца довольно равномерное и соответствует стехиометрическому составу сплава (табл. 2).

При увеличении $\times 2400$, как и для образцов исходного материала, было определено расстояние между ламелями (рис. 4, б). Поскольку материал после зонного переплава имеет ламельную структуру, состоящую из вытянутых вдоль направления движения зоны длинных непрерывных ламелей, то определить их размер не представлялось возможным. Расстояние между ламелями составляло 4,67 мкм, что на 18 % меньше, чем у основного материала.

В работе [6] показано, что значения пластичности наиболее сильно зависят от типа структуры, а механические характеристики интерметаллидных сплавов, имеющих ламельную структуру, — в боль-

шей степени от соотношения между длиной ламелей и расстоянием между ними. При оптимальных сочетаниях параметров пластинчатой структуры пластичность таких сплавов может быть не хуже, чем у глобулярной.

Механические испытания на одноосное растяжение при комнатной температуре позволили установить, что прочность интерметаллида после зонной плавки равняется 580 МПа, а относительное удлинение — 2,2 %, в то время как прочность основного материала достигает 524 МПа, а относительное удлинение — 0,8 %.

Таким образом, проведенные исследования показали, что зонная перекристаллизация интерметаллида системы Ti–Al–Nb–Zr–Cr, полученного способом ЭЛПЕ, обеспечивает направленную кристаллизацию, уменьшение размера зерна интерметаллида, снижение твердости и более равномерное ее распределение по сечению и объему слитка, что способствует повышению прочности и пластичности интерметаллида и подтверждается результатами механических испытаний.

1. Жук Г. В., Тригуб Н. П., Замков В. Н. Получение слитков γ -алюминид титана методом ЭЛПЕ // Современ. электрометаллургия. — 2003. — № 4. — С. 20–22.
2. Пфанн В. Зонная плавка. — М.: Мир, 1970. — 368 с.
3. Имаев В. М., Имаев Р. М., Хисматуллин Т. Г. Механические свойства литого интерметаллидного сплава Ti–43Al–7(Nb,Mo)–0,2B (ат. %) после термической обработки // Физика металлов и металловедение. — 2008. — 105, № 5. — С. 516–522.
4. Структура и некоторые свойства литых сплавов на основе TiAl, легированных V, Nb, Ta, Hf, Zr / К. Б. Поварова, О. А. Банных, И. В. Бузов и др. // Металлы. — 1998. — № 3. — С. 31–41.
5. Кузнецов А. В., Имаев В. М., Имаев Р. М. Микроструктурный контроль и механические свойства интерметаллидных сплавов на основе γ -TiAl + α_2 -Ti₃Al // Там же. — 2002. — № 6. — С. 102–110.
6. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. — М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. — С. 466–468.

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

Поступила 24.03.2011



УДК 669.187.56.001.3

МГД ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ (Обзор)

И. В. Протокилов

Рассмотрены примеры использования магнетогидродинамических (МГД) эффектов в металлургических процессах. Показаны задачи применения электромагнитных воздействий, приведены классификация и принцип работы основных МГД устройств.

Examples of application of magnetohydrodynamic (MHD) effects in metallurgical processes are considered. The tasks of application of electromagnetic effects are shown, classification and principle of operation of main MHD-devices are given.

Ключевые слова: металлургия; магнитная гидродинамика; магнитное поле; электромагнитное воздействие; МГД технологии, кристаллизация металла

Введение. Металлургия традиционно является одной из основных отраслей использования магнетогидродинамических (МГД) эффектов. Это связано с наличием в металлургических печах больших объемов токопроводящих жидкостей — расплавов металлов и шлаков. При этом с учетом специфики металлургического производства (высокие температуры и агрессивные среды) зачастую требуется использование бесконтактных способов силового воздействия на расплавы для решения различных технологических задач, а также управление свойствами выплавляемого металла. Такие воздействия

можно реализовать на основе применения электромагнитных сил.

Работы по созданию металлургических МГД технологий начали активно проводиться с начала 1960-х гг. Сейчас они получили широкое развитие и нашли практическое применение на различных стадиях металлургического передела: при транспортировке и дозировке металлургических расплавов, для интенсификации тепло- и массопереноса в плавильных агрегатах, рафинирования металлов и сплавов, управления процессом кристаллизации слитков и др. (рис. 1) [1–5].

Принцип действия большинства металлургических МГД устройств основан на взаимодействии создаваемого ими внешнего магнитного поля с электрическим током, протекающим в токонесущей жид-

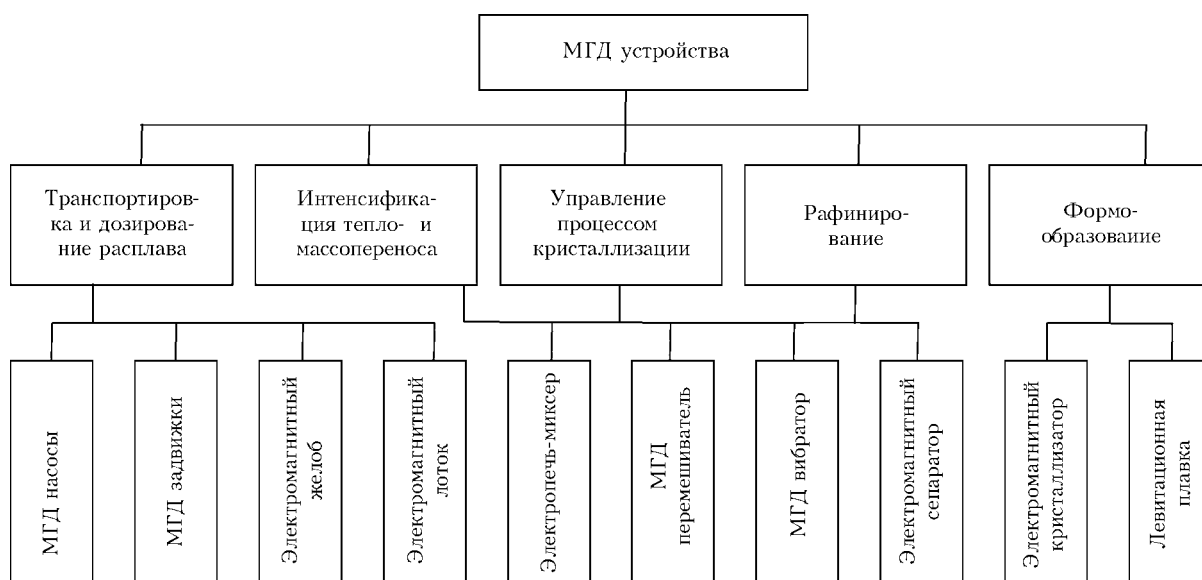


Рис. 1. Назначение и типы металлургических МГД устройств

© И. В. ПРОТОКОВИЛОВ, 2011

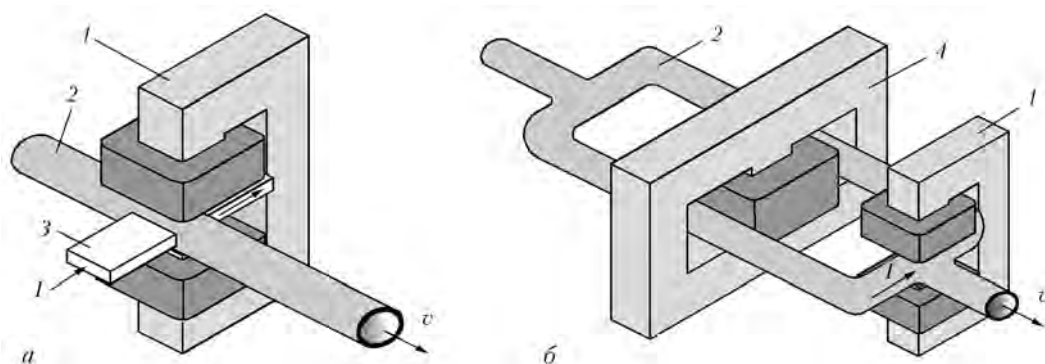


Рис. 2. Принципиальная схема кондукционного (а) и индукционного, трансформаторного типа (б) МГД насосов: 1 — электромагнит; 2 — канал; 3 — токоподвод; 4 — индуктор; I — ток; v — скорость движения расплавов

кости (металлургическом расплаве). В результате такого взаимодействия в жидкой среде возникают объемные электромагнитные силы, приводящие к силовому воздействию на жидкость. Значение и направление этих сил определяются векторным произведением индукции магнитного поля и плотности тока в расплаве. Соответственно, наибольшее значение электромагнитные силы имеют в случае, когда векторы магнитного поля и тока взаимно перпендикулярны (так называемые скрещенные поля).

Следует подчеркнуть, что все металлы в расплавленном состоянии практически немагнитны и для использования электромагнитных сил важно, чтобы среда была проводящей.

По способу создания электрического тока в расплаве МГД устройства делятся на два основных класса: кондукционные (рис. 2, а) и индукционные (рис. 2, б). В устройствах первого типа электри-

ческий ток вводится в расплав непосредственно с помощью специальных токоподводов. Необходимость контактного подвода тока из внешней цепи к высокотемпературным, химически агрессивным расплавам ограничивает применение таких устройств в металлургии. Исключение составляют случаи, когда ток в расплаве обусловлен самим технологическим процессом (например, ток плавки при ЭШП или ВДП). Указанных недостатков лишены устройства второго типа, в которых ток в расплаве возбуждается индукционным способом с помощью переменных электромагнитных полей (пульсирующего, бегущего, вращающегося).

МГД насосы. Одними из первых МГД эффекты стали применяться в устройствах для транспортировки и дозирования жидких металлов (рис. 2–4). Уже в первых описаниях электромагнитных насосов

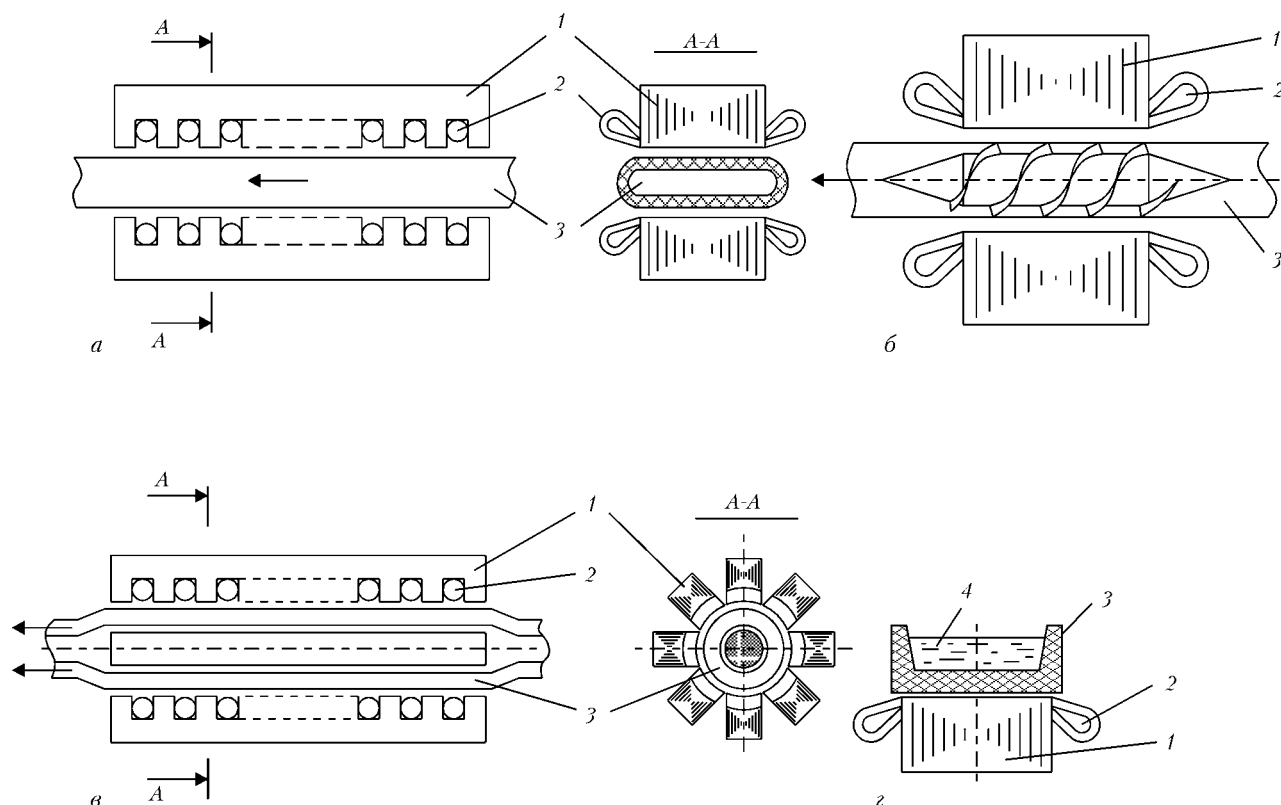


Рис. 3. Индукционные насосы с бегущим магнитным полем (а, в), с вращающимся магнитным полем и винтовым каналом (б), электромагнитный желоб (в): 1 — магнитопровод; 2 — обмотка; 3 — канал; 4 — жидкий металл

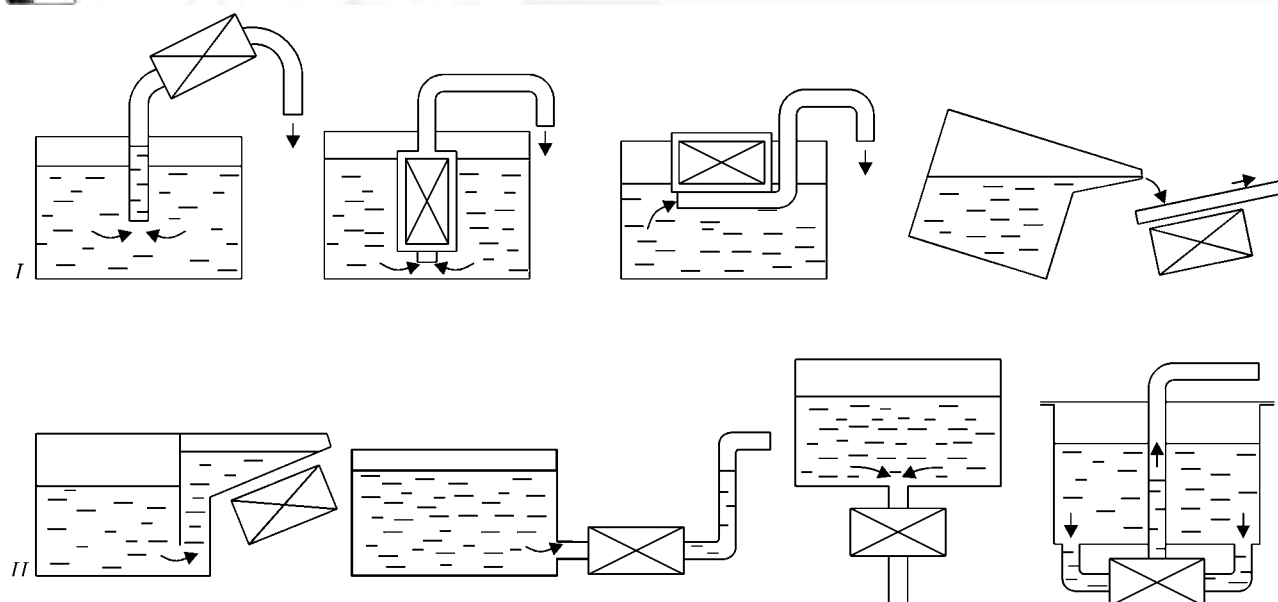


Рис. 4. Схемы компоновки электромагнитных насосов с печами: *I* — не связан с печью; *II* — жестко связан с печью

указывается на важнейшие достоинства таких устройств — отсутствие механически движущихся частей, возможность их работы в полностью закрытых, герметичных объемах, плавное регулирование производительности.

Сейчас разработаны и серийно выпускаются большое количество МГД насосов, отличающихся по назначению и конструктивному исполнению (рис. 3) [3, 6, 7]. Принцип их действия основан на создании в активной зоне канала насоса разницы давлений посредством использования объемных электромагнитных сил. Поэтому в большинстве случаев поток в канале насоса является напорным. В электромагнитном желобе, в отличие от насоса, расплав перемещается в виде безнапорного потока, имеющего свободную поверхность (рис. 3, *з*).

Электромагнитные насосы используют для перекачивания магния, цинка, олова, свинца, галлия,

сплавов на основе алюминия, черных металлов. Их применяют в системах транспортировки и дозированной подачи расплавов в изложницы или литейные формы, для технологического или аварийного выпуска (слива) расплава из ванн емкостей и т. д. Насосы изготовляют как в виде отдельных агрегатов, так и в составе специализированных установок для подогрева, внепечной обработки и разлива сплавов цветных и черных металлов (рис. 4, табл. 1). Разработанные насосы развивают давление до 6 МПа и производительность — до 70 т металла в час при потребляемой мощности до 700 кВт [4, 7].

МГД перемешиватели. Другим, широко используемым в металлургии, классом МГД устройств являются МГД перемешиватели. Принцип их действия основан на бесконтактном воздействии создаваемого ими переменного магнитного поля на то-

Таблица 1. Характеристики некоторых серийно выпускаемых МГД установок [5, 6]

Тип установки	Металл	Выполняемые операции	Полезная масса загрузки ванны, кг	Подача сплава при заливке, кг/с	
				Наименьшая	Наибольшая
МДН-6А-0,16	Алюминий и его сплавы	Подогрев, внепечная обработка и заливка в литейные формы	160	0,3	2,5
МДН-6А-0,25			250	0,4	3,0
МДН-6А-0,4			400	0,5	3,0
МДН-6А-0,6			600	0,6	3,5
99801 (МДН-6С)	Свинец, олово и их сплавы	Плавка, подогрев, доводка и заливка в литейные формы и изложницы	600	0,3	3,0
99411 (99412)	Чугун	Подогрев, внепечная обработка и заливка на центробежных каруселях и автоматических формовочных линиях	2500	0,8	12,0
99413 (МДН-6Ч)			6300	3,0	20,0
МДУ-26С-6,3	Сталь	Индукционный подогрев, хранение и периодическая подача в кристаллизатор установки электрошлаковой наплавки прокатных валков	6300	1,0	10,0



Рис. 5. Внешний вид МГД перемешивателя с вращающимся магнитным полем [8]

копроводящий расплав. Конструктивно системы для электромагнитного перемешивания представляют собой один или несколько индукторов с медными или алюминиевыми обмотками (рис. 5). Чаще всего используется двух- или трехфазный переменный ток частотой 1... 50 Гц при потребляемой мощности 10... 3000 кВт. Существует два основных типа перемешивателей: генерирующих вращающееся и бегущее магнитные поля.

В первом случае электромагнитный перемешиватель является по сути статором асинхронного двигателя (рис. 5), а ротором — жидкий металл. Такой индуктор создает в расплаве азимутальное (вокруг оси ванны) вращение (рис. 6, а). Бегущее магнитное поле генерируется плоско-линейным индуктором, создающим в расплаве течения вдоль полюсов индуктора (рис. 6, б). В некоторых современных перемешивателях используют оба типа индукторов, что дает возможность раздельного управления интенсивностью азимутальных и меридиональных течений [9, 10].

Кроме указанных типов перемешивателей, существуют погружные электромагнитные перемешиватели, опускаемые непосредственно в расплав металлургической печи [1]. Их использование позво-

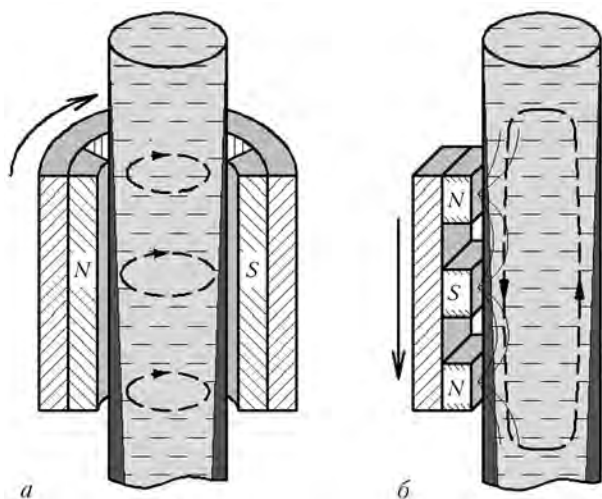


Рис. 6. Схема перемешивания жидкого металла вращающимся (а) и бегущим (б) магнитными полями

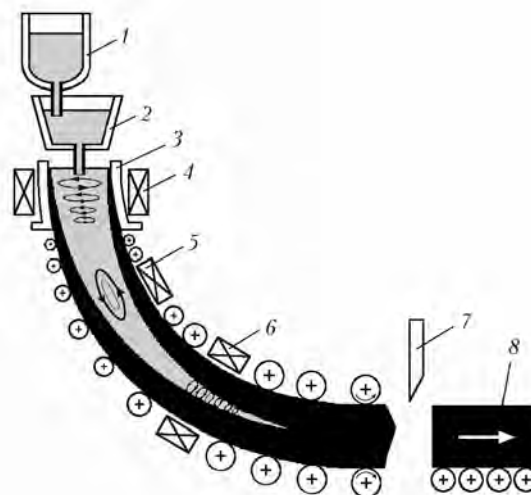


Рис. 7. Электромагнитное перемешивание при непрерывной разливке стали: 1 — разливочный ковш; 2 — промежуточный ковш; 3 — кристаллизатор; 4–6 — ЭМП соответственно в кристаллизаторе, зоне вторичного охлаждения, зоне окончания затвердевания; 7 — резак; 8 — мерная заготовка

ляет уменьшить расстояние между индуктором и жидким металлом, поскольку защитная футеровка перемешивателя значительно тоньше футеровки печи, и тем самым увеличить эффективность электромагнитного воздействия.

Машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

Широкое применение электромагнитное перемешивание (ЭМП) металла получило при непрерывном литье стальных заготовок [3, 10–13]. В данном случае его используют для решения следующих задач:

- улучшения внутреннего строения заготовки (измельчения структуры, снижения степени ликвации, уменьшения центральной пористости);

- улучшения качества поверхности заготовки (снижения количества поверхностных дефектов, увеличения толщины наружной корочки);

- повышения скорости разливки металла.

В современных МНЛЗ применяются способы многоступенчатого перемешивания в двух или трех уровнях: кристаллизаторе, зоне вторичного охлаждения, зоне окончания затвердевания [11] (рис. 7). В кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания непрерывно-литой заготовки устанавливают оборудование, создающее вращающееся магнитное поле, а в средней части МНЛЗ — бегущее.

ЭМП в зоне кристаллизатора позволяет уменьшить центральную ликвацию и пористость заготовки, повысить химическую однородность металла, способствует увеличению теплоотвода и уменьшает вероятность прорыва корочки затвердевшего металла, что, в свою очередь, позволяет повысить производительность процесса разливки.

Перемешивание на финальных участках затвердевания заготовки служит для улучшения качества ее центральной зоны, измельчения структуры металла посредством подавления роста столбчатой кристаллизации и увеличения зоны равноосных кристаллов.

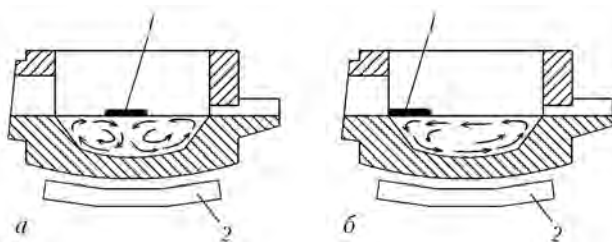


Рис. 8. Движение металла и шлака в дуговой печи при разных режимах работы перемешивателя: *а* — перемешивание; *б* — скачивание шлака; 1 — шлак; 2 — МГД перемешиватель

В целом электромагнитное перемешивание в процессе непрерывной разливки стали позволяет следующее [14]:

- уменьшить количество поверхностных дефектов в 2-3 раза;

- увеличить зону равноосных кристаллов на 50... 100 %;

- уменьшить центральную пористость и ликвацию до 0 баллов;

- повысить скорость разливки на 20... 30 %;

- расширить возможности литья с более высокой температурой перегрева на 10... 15 °С;

- увеличить сортамент разливаемых марок сталей, в том числе высокоуглеродистых и специальных (подшипниковых, нержавеющей и инструментальных).

Помимо МГД перемешивателей, в МНЛЗ используют системы с постоянным магнитным полем, снижающие глубину проникновения струи металла в ванне (так называемый способ электромагнитного торможения) [15]. Оборудование включает расположенные вдоль стенок кристаллизатора намагничивающие катушки, создающие сильное магнитное поле, которое замедляет скорость поступающей в кристаллизатор струи металла, благодаря чему неметаллические включения могут быстро всплывать на поверхность мениска. При этом предотвращается размывание корочки узких граней слывовой заготовки, уменьшается содержание включений и микродефектов в ее металле. Применение электромагнитного торможения обеспечивает повышение скорости разливки на 30 % без увеличения загрязненности металла включениями.

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП). Применение ЭМП в ДСП дает возможность ускорять процесс плавки и улучшать качество металла [16, 17]. Так, температурный перепад по глубине ванны ДСП может достигать 100 °С, поскольку дугой непосредственно прогреваются только верхние слои металла. Перемешивание выравнивает температуру металла, интенсифицирует процессы химического взаимодействия, позволяет равномерно распределить легирующие присадки.

Электромагнитное воздействие в ДСП нацелено на выполнение двух основных задач: перемешивание расплава с целью интенсификации тепло- и массообмена, а также облегчение процесса скачивания шлака путем создания направленного движения его к рабочему окну печи.

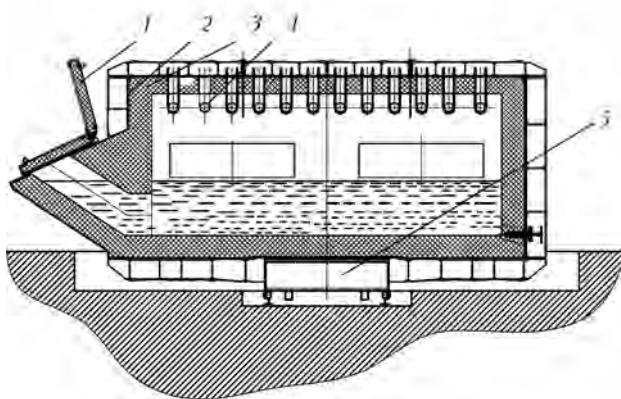


Рис. 9. Камерная электропечь-миксер типа САМП: 1 — заливочная крышка; 2 — кожух; 3 — футеровка; 4 — нагревательные элементы; 5 — МГД перемешиватель

МГД перемешиватель, представляющий собой развернутый статор, устанавливают преимущественно под днищем печи (рис. 8). Обмотки перемешивателя питаются токами частотой от 0,3 до 1,5 Гц, при этом мощность на одну фазу достигает 860 кВт [17].

В режиме перемешивания обмотки статора коммутируются таким образом, чтобы направления движения магнитных полей у сливного носка и рабочего окна были противоположны (рис. 8, *а*). При этом обеспечивается интенсивное вертикальное перемешивание ванны. В режиме скачивания шлака бегущее магнитное поле вызывает движение металла от сливного носка к рабочему окну (рис. 8, *б*). Шлак также сдвигается к рабочему окну, что облегчает его скачивание путем небольшого наклона печи в сторону рабочего окна.

Технико-экономические преимущества от использования ЭМП заключаются в увеличении в среднем на 20 % производительности печи, экономии легирующих элементов, повышении качества выплавляемого металла при сокращении в 2-3 раза брака по неметаллическим включениям [17].

Приготовление и литье алюминиевых сплавов.

Электромагнитное перемешивание широко применяется в алюминиевой промышленности для гомогенизации и рафинирования расплавов в плавильных или раздаточных печах, транспортных ковшах, миксерах, при полунепрерывном литье слитков [18-21].

В миксерах и печах устанавливают преимущественно МГД перемешиватели бегущего магнитного поля, которые размещают в нижней части (днище) миксера или печи, или возле боковой стенки (рис. 9) [18]. Такие перемешиватели в настоящее время эксплуатируются на Саяногорском, Красноярском, Братском, Новокузнецком, Иркутском алюминиевых заводах, предприятиях США, Канады, Франции [19].

Применение ЭМП позволяет эффективнее и с меньшими затратами электроэнергии доводить алюминиевые сплавы до однородности по химическому составу. При этом на 25 % повышается производи-

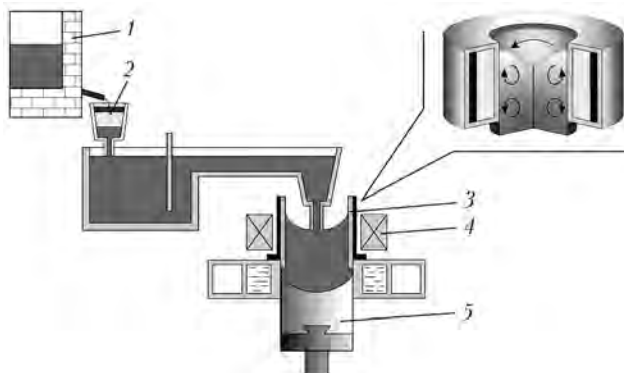


Рис. 10. Схема литья алюминиевых слитков с МГД перемешиванием расплава: 1 — плавильная печь; 2 — фильтр; 3 — тепловая насадка; 4 — МГД перемешиватель; 5 — слиток

тельность процесса, на 15 % уменьшаются количество потребляемой электроэнергии и температурный перепад между зеркалом металла и подиной от 140 до 5...12 °С, снижается насыщение алюминиевого расплава водородом и его окисление, сокращается количество шлаков на 15...25 %, а также продолжительность приготовления сплавов [19].

При полунепрерывном литье алюминиевых слитков ЭМП используют с целью равномерного распределения компонентов сплава по сечению слитка и управления формой и размером зерен. Для интенсивного перемешивания жидкой фазы в области кристаллизации расплава применяют МГД перемешиватели, генерирующие течения в горизонтальном и вертикальном направлениях одновременно с возможным раздельным управлением интенсивностью этих движений (рис. 10) [20].

Измельчение зерна деформируемых сплавов при литье с перемешиванием позволяет избегать необходимости их модифицирования путем введения в сплавы ответственного назначения искусственных

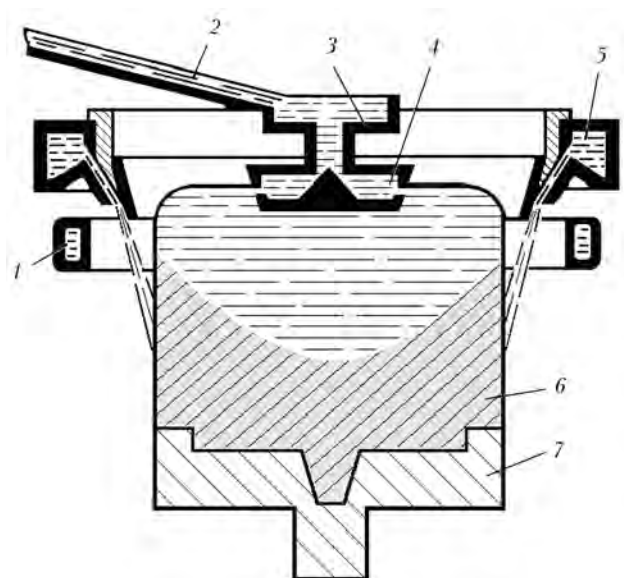


Рис. 11. Схема литья в электромагнитный кристаллизатор [3]: 1 — индуктор; 2 — лоток; 3 — распределительная коробка; 4 — плавающая чаша; 5 — коллектор с охлаждающей жидкостью; 6 — слиток; 7 — поддон

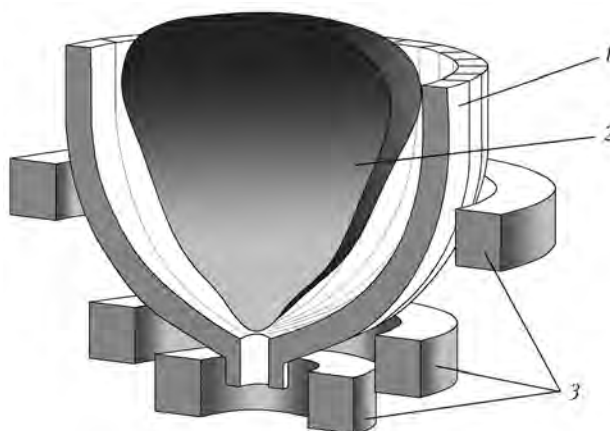


Рис. 12. Схема левитационной плавки в холодном тигле [23]: 1 — холодный тигель (секционный кристаллизатор); 2 — расплавленный металл; 3 — индуктор

центров кристаллизации, что приводит к снижению значений ресурсных характеристик сплава [20].

Бестигельная плавка металлов. Перспективным направлением применения МГД эффектов в металлургии является использование электромагнитных сил для формообразования слитка. Примером такой технологии является литье в электромагнитный кристаллизатор (рис. 11) [3, 22]. Особенность данного процесса состоит в том, что с целью бесконтактного формообразования отливки разливаемый металл подают в электромагнитное поле, удерживающее его в заданных контурах, одновременно осуществляя принудительное охлаждение, обеспечивающее затвердевание отливки. Указанная технология реализована при литье алюминиевых сплавов. Техничко-экономический эффект технологии выражается в повышении качества поверхности слитков, улучшении кристаллической структуры металла, увеличении производительности процесса разливки [3, 22].

Другим примером использования электромагнитных сил для формообразования металла является бестигельная (или левитационная) плавка [23, 24]. Бестигельная плавка без соприкосновения расплава со стенками тигля эффективна при получении сверхчистых металлов и сплавов (титан, цирконий, ванадий, тантал и другие), когда загрязнение металла материалом тигля недопустимо.

Принцип бестигельной плавки основан на индукционном нагреве и электромагнитной левитации (рис. 12). Сформированное индуктором специальной конструкции высокочастотное электромагнитное поле индуцирует в металле вихревые токи, обеспечивающие его нагрев и плавление.

В свою очередь, взаимодействие этих токов с возбуждающим их магнитным полем способствует отжатию от стенок и удержанию расплава во взвешенном состоянии.

Главным недостатком данного способа плавки является ограниченность массы расплава и его устойчивости при нагреве. Количество левитирующе-

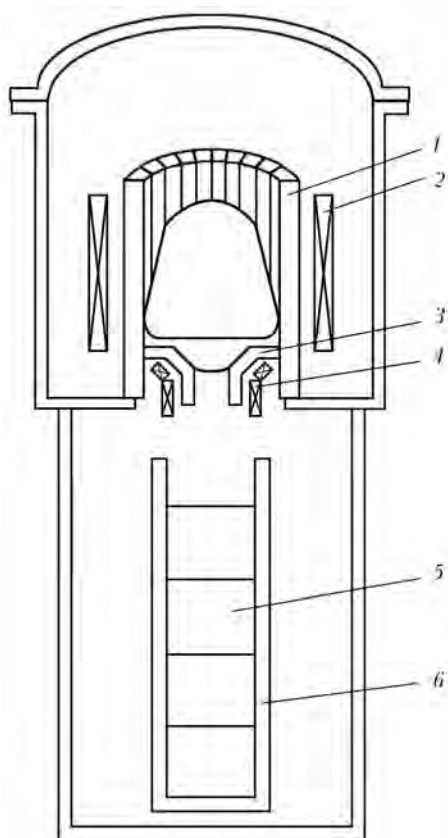


Рис. 13. Схема левитационной плавки в холодном тигле с донным выпуском металла [24]: 1 — холодный тигель (секционный кристаллизатор); 2 — плавильный индуктор; 3 — выпускной патрубок; 4 — выпускной индуктор; 5 — слиток; 6 — изложница

го металла может составлять от нескольких десятков до сотни граммов.

Исследования в этом направлении активно развиваются. Так, в работе [23] путем математического моделирования показана возможность левитации двухкилограммового объема жидкого металла без контакта со стенками холодного тигля. В публикации [24] приведен пример «частичной левитации» до 500 кг жидкого металла в холодном тигле диаметром 600 мм. Данный процесс использовали при получении двухтонного слитка сплава Ti-6Al-4V (рис. 13).

МГД сепарация. В металлургических процессах МГД сепарация применяется для рафинирования металла от пор и включений, а также извлечения металла из шлака [1–3, 25, 26]. Существуют различные механизмы МГД сепарации, основанные на разнице плотности и электропроводности материалов.

Один из механизмов удаления включений основан на изменении удельного веса расплава под действием скрещенных электрического и магнитных полей [3]. Так, искусственное утяжеление жидкого металла приводит к увеличению выталкивающей силы, повышению скорости и эффективности всплытия неметаллических включений или газовых пор. Для удале-

ния включений, плотность которых выше таковой металла, применяется искусственное облегчение расплава, способствующее увеличению скорости их осаждения на дне емкости или канала.

Другой механизм удаления включений основан на создании под действием электромагнитных сил азимутального вращения ванны. Включения с плотностью выше таковой металла под действием центробежных сил вытесняются к стенкам формирующего устройства и при затвердевании металла концентрируются на поверхности заготовки.

При различных значениях электропроводности расплава и взвешенных в нем частиц используют МГД сепарацию, основанную на силе, действующей на частицу при пропускании через расплав электрического тока или наложении магнитного поля [27]. Такой принцип сепарации применяют для удаления, например частиц Cr_3C_2 из сплавов на основе меди [25] и SiC из алюминия [26] и др.

Электронно-лучевая плавка (ЭЛП). Для электронно-лучевых технологий применение электромагнитных воздействий принципиально важно, поскольку до настоящего времени единственным способом воздействия на процесс кристаллизации остается регулирование нагрева поверхности расплава в кристаллизаторе электронным лучом [28].

Использование электромагнитного перемешивания при ЭЛП впервые было реализовано в 1970-е гг. в Институте проблем литья НАН Украины [28–30]. Многочисленные исследования, проведенные при плавке сплавов на основе никеля, титана, нержавеющей сталей, циркония, ниобия, меди, показали, что применение ЭМП позволяет уменьшить удельный расход электроэнергии, повысить производительность процесса, сократить потери металла вследствие испарения, уменьшить размер зерен [30]. Важным достоинством ЭМП при ЭЛП является возможность выплавки многокомпонентных сплавов, в том числе содержащих легколетучие элементы.

К настоящему времени разработаны различные кристаллизаторы с системами ЭМП, один из которых показан на рис. 14. Кристаллизатор представляет собой медную водоохлаждаемую цилиндрическую емкость с продольными разрезами в зоне размещения системы ЭМП. Его устанавливают в литейную камеру на одной оси со сливным отверстием плавильного тигля.

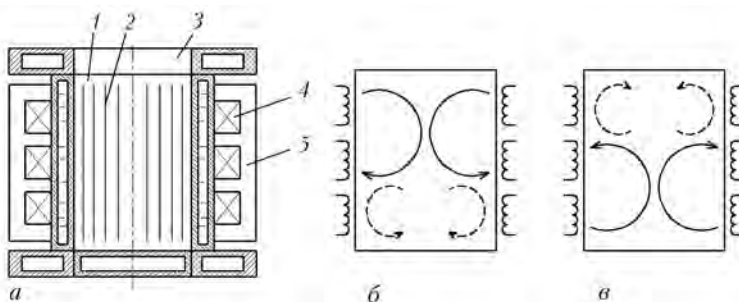


Рис. 14. Схема кристаллизатора с системой ЭМП (а) и возможные контуры циркуляции расплава (б, в) [28]: 1 — медная водоохлаждаемая емкость; 2 — сквозные разрезы; 3 — водоохлаждаемый фланец; 4 — катушки индуктора; 5 — магнитопровод



Таблица 2. Сравнительная характеристика структуры слитков титана, полученных разными способами ЭЛП [30]

Способ плавки	Размер и характерная форма конечного β -зерна, мм	Размер внутренних α -колоний, мкм	Толщина α -пластин в колониях, мкм
С ЭМП расплава	6...7 (6 баллов), равноосное	70...100 (2 балла)	5...7 (2 балла)
Без перемешивания	7...12 (9 баллов), эллипсоподобное	80...120 (3 балла)	6...10 (3 балла)

Система ЭМП состоит из катушек индукторов, расположенных вокруг емкости и охваченных магнитопроводом. Питание катушек осуществляется токами промышленной частоты при напряжении 18 В и токе 600 А. В зависимости от схемы подключения питания системы ЭМП возможно создание циркуляции расплава в кристаллизаторе от стенки к центру (рис. 14, б) и от центра к стенке (рис. 14, в) или поочередное знакопеременное перемешивание.

При ЭЛП с ЭМП важно свести к минимуму негативное влияние электромагнитных полей на электронный луч. Последнего достигают с помощью экранирования магнитного поля над верхним срезом кристаллизатора водоохлаждаемым фланцем, выполненным в виде короткозамкнутого витка.

Результаты оценки эффективности использования электромагнитного воздействия при выплавке слитков титана ВТ1-0 представлены в табл. 2.

Вакуумно-дуговой переплав (ВДП). При ВДП электромагнитное воздействие используют как для управления движением металла, так и для стабилизации горения дуги или принудительного ее перемещения по торцу расходоуемого электрода [16, 17, 31, 32]. В большинстве случаев электромагнитное устройство представляет собой соленоид постоянного тока, охватывающий кристаллизатор.

Применение соленоидов с осевым магнитным полем стабилизирует дуговой разряд и предотвращает его переброс на стенку кристаллизатора, тем самым снижая взрывоопасность печи.

Результаты применения электромагнитного перемешивания при ВДП для разных сплавов неодинаковы. Перемешивание положительно сказывается на усреднении температуры металла и равномерном распределении легирующих компонентов по объему ванны, а также на структуре титановых сплавов [32].

В то же время азимутальное перемешивание металла может приводить к негативным последствиям, в частности появлению пятнистой ликвации. В первую очередь это относится к сталям и высоколегированным сплавам, склонным к ликвации (ШХ15, ЭИ437БУ и др.) В данном случае принимают специальные меры для торможения циркуляции расплава. Например, рекомендуется перио-

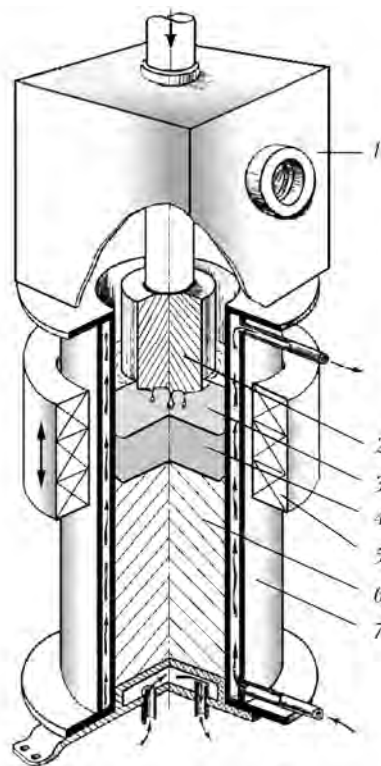


Рис. 15. Схема магнитоуправляемой электрошлаковой плавки: 1 — вакуумная камера; 2 — электрод; 3 — шлаковая ванна; 4 — металлическая ванна; 5 — электромагнитная система; 6 — слиток; 7 — кристаллизатор

дическое изменение полярности тока в соленоиде с частотой 0,07...0,017 Гц [17].

В целом эффективность применения электромагнитного перемешивания при ВДП определяется в каждом отдельном случае для конкретного сплава и типоразмера выплавляемого слитка.

Электрошлаковый переплав (ЭШП). ЭШП является благоприятным металлургическим процессом с точки зрения электромагнитного управления [33, 34]. Прежде всего это связано с тем, что при ЭШП через расплавы шлаковой и металлической ванн протекает рабочий ток значительного уровня (десятки килоампер), что позволяет использовать его для электромагнитного управления. Важно и то, что электрошлаковый процесс характеризуется широким диапазоном режимов его устойчивого протекания.

Основными задачами электромагнитного воздействия при ЭШП является повышение химической однородности выплавляемого металла и улучшение кристаллической структуры слитка. Кроме того, магнитные поля позволяют воздействовать на особенности плавления расходоуемого электрода, характер образования и отрыва капель электродного металла, траектории их движения в шлаковой ванне и тем самым добиваться требуемых технологических и металлургических эффектов [34].

Принцип электромагнитного воздействия при ЭШП состоит во взаимодействии созданного специальным устройством внешнего магнитного поля с электрическим током плавки, в результате чего в расплавах формируются объемные электромагнит-

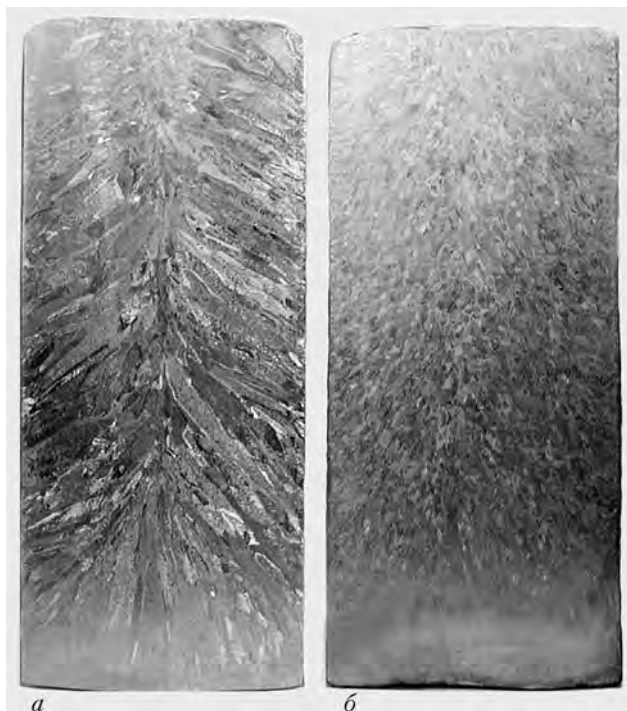


Рис. 16. Макроструктуры титановых слитков ЭШП, выплавленных без электромагнитного воздействия (а) и с ним (б)

ные силы, приводящие к силовому воздействию на расплав. В зависимости от характеристик внешнего магнитного поля в расплавах шлаковой и металлической ванн можно создавать электровихревые течения или вибрацию расплава.

Уже в первых работах по ЭШП с наложением магнитных полей отмечали измельчение кристаллической структуры слитка, сокращение расхода электроэнергии и длительности плавки [35, 36]. Затем было обнаружено, что стационарное вращение расплава вокруг оси ванны, вызванное наложением продольного и радиального магнитных полей, может вызывать негативные эффекты — увеличение глубины металлической ванны и нежелательное изменение ее формы [37].

В работах [34, 38, 39] исследовано влияние внешних магнитных полей на технологические и металлургические особенности ЭШП титановых сплавов. На основе проведенных исследований разработана технология магнитоуправляемой электрошлаковой плавки (МЭП) титановых сплавов (рис. 15).

Показано, что эффективной схемой электромагнитного воздействия при МЭП является импульсное воздействие на металлургическую ванну продольным магнитным полем. В этом случае магнитное поле взаимодействует с радиальной составляющей тока плавки. Такая схема позволяет реализовать в ванне как электровихревые течения, так и вибрацию расплава. При этом обеспечивается интенсивное перемешивание жидкого металла и измельчение кристаллической структуры слитка (рис. 16). Формирование однородной мелкозернистой структуры обеспечивает высокую технологичность металла на стадии деформации и последующих переде-

лов, высокие значения его механических характеристик и работоспособность.

Заключение

МГД технологии находят все более широкое практическое применение в различных металлургических процессах. Помимо решения технологических задач по транспортировке и дозированию расплавов металла и шлака, воздействие внешними магнитными полями широко используют для интенсификации тепло- и массопереноса в плавильных агрегатах и управления процессом кристаллизации металла. Применение МГД эффектов в металлургии нацелено на улучшение свойств получаемых металлов и сплавов, снижение их стоимости, получение новых свойств и материалов.

1. Верте Л. А. Магнитная гидродинамика в металлургии. — М.: Металлургия, 1975. — 288 с.
2. Повх И. Л., Капуста А. Б., Чекин Б. В. Магнитная гидродинамика в металлургии. — М.: Металлургия, 1974. — 240 с.
3. Верте Л. А. МГД-технологии в производстве черных металлов. — М.: Металлургия, 1990. — 120 с.
4. Повх И., Баринберг А., Баринберг В. Профессии магнитной гидродинамики // Наука и жизнь. — 1977. — № 6. — С. 40–46.
5. Дубоделов В. И. Состояние и перспективы развития исследований и разработок в области металлургической магнитной гидродинамики // Процессы литья. — 1998. — № 3. — С. 36–43.
6. Магнитодинамические насосы для жидких металлов / В. П. Полищук, М. Р. Цин, Р. К. Горн и др. — Киев: Наук. думка, 1989. — 256 с.
7. <http://www.niikhemz.com.ua/24.htm>.
8. Barglik J., Smagor A. Some aspects of electromagnetic stirring during process of continual steel casting // Proc. of the 6th Intern. conf. on Electromagnetic processing of materials EMP 2009 (Oct. 19–23, 2009, Dresden, Germany). — Dresden, 2009. — P. 684–687.
9. MULTIMAG — A MULTIpurpose MAGnetic field system for EMP / A. Cramer, J. Pal, Th. Gundrum, G. Gerdeh // Ibid. — Dresden, 2009. — P. 826–829.
10. <http://www.icmm.ru/~lab4/download/mhdadvent.htm>.
11. Применение электромагнитного перемешивания в технологии непрерывной разливки стали / И. Н. Шифрин, В. Г. Грачев, В. И. Плантаус и др. // Сталь. — 2005. — № 1. — С. 17–20.
12. Кудрин В. А. Внепечная обработка чугуна и стали. — М.: Металлургия, 1992. — 336 с.
13. Thomas B., Chaudhary R. State of Art in Electromagnetic Flow Control in Continuous Casting of Steel Slabs // Proc. of the 6th Intern. conf. Electromagnetic processing of materials EMP 2009 (Oct. 19–23, 2009, Dresden, Germany). — Dresden, 2009. — P. 9–14.
14. <http://www.vniimetmash.ru/products/mnlz/mnlz.shtml>.
15. Kollberg S. Continius Cast Proc. 4 th Intern. Iron and steel Congr. (London, 12–14 May, 1982). — London, 1982. — B5/1–B5/4.
16. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева / Под. ред. А. Д. Свенчанского. — М.: Энергоиздат, 1981. — 296 с.
17. Тур Л. Л., Столов М. Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах. — М.: Металлургия, 1975. — 224 с.
18. Бабышкин Г. А., Деревянных А. А., Лазарев В. А. Камерные электропечи-миксеры для алюминиевой промышленности // www.therm.ru/60/60.files/60-11.htm.
19. <http://www.npcmgd.ru/> (ООО «Научно-производственный центр магнитной гидродинамики»).
20. Борисов В. Г. Управление структурой алюминиевых заготовок при непрерывном литье с МГД перемешиванием расплава // Металлургия машиностроения. — 2009. — № 3. — С. 39–44.
21. Kim M., Kim J., Park J. Designing of Continuous Casting Machine for Near Net Shape Aluminium // Proc. of the 6th Intern. conf. Electromagnetic processing of materials



- EMP 2009 (Oct. 19–23, 2009, Dresden, Germany). — Dresden, 2009. — P. 323–325.
22. Мочалов П. П., Гецелев З. Н. Непрерывное литье с формированием слитка электромагнитным полем // Цв. металлы. — 1970. — № 8. — С. 62–63.
 23. Bojarevics V., Roy A., Pericleous K. A. Magnetic Levitation of Large Liquid Volume // Proc. of the 6th Intern. Scientific Colloquium «Modelling for Material Processing» (Riga, Sept. 16–17, 2010). — Riga, 2010. — P. 15–20.
 24. Okumura T., Yamamoto K., Shibata M. Large Scale Cold Crucible Levitation Melting Furnace with Bottom Taping Nozzle // Proc. of the 6th Intern. conf. Electromagnetic proc. of materials EMP 2009 (Oct. 19–23, 2009, Dresden, Germany). — Dresden, 2009. — P. 521–524.
 25. Electromagnetic separation of inclusions from molten copper by alternating electromagnetic field // M. Higuchi, H. Ambai, S. Shimasaki at al. // Proc. of the 6th Intern. conf. on Electromagnetic proc. of materials EMP 2009 (Oct. 19–23, 2009, Dresden, Germany). — Dresden, 2010. — P. 86–89.
 26. Taniguchi S., Yoshikawa N., Takahashi K. Application of EMP to the separation of inclusion particles from liquid metal // Proc. of the Joint 15th Riga and 6th PAMIR Intern. conf. «Fundamental and Applied MHD» (Riga, June 27–July 1, 2005). — Riga, 2005. — P. 55–63.
 27. Электровихревые течения / В. В. Бояревич, Я. Ж. Фрейберг. — Рига: Зинатне, 1985. — 315 с.
 28. Ладохин С. В., Чернявский В. Б., Гладков А. С. Экспериментальное исследование распределения электромагнитных полей в кристаллизаторе для получения слитков в электронно-лучевых установках // Процессы литья. — 2006. — № 1. — С. 17–22.
 29. Панасюк Л. С., Ульянов В. Л., Явич В. Е. Электромагнитное перемешивание жидкого металла при электронно-лучевой плавке // Литье тугоплавких металлов. — Киев: ИЛ АН УССР, 1970. — Вып 1. — С. 76–87.
 30. Чернявский В. Б., Ладохин С. В., Гладков А. С. Плавильные тигли и кристаллизаторы с системами электромагнитного перемешивания для электронно-лучевой плавки металлов и сплавов // Процессы литья. — 2005. — № 1. — С. 48–55.
 31. Effect of electromagnetic stirring on melt pool free surface dynamics during vacuum arc remelting / P. Chapelle, A. Jardy, J. Bellot, M. Minvielle. // J. of Materials Science. — 2008. — V. 43. — P. 5734–5746.
 32. Effects of VAR Processing Parameters on Solidification Behavior of Ti-10V-2Fe-3Al Alloy Ingot / Yang Zhijun, Kou Hongchao, Chang Hui at al. // Special Casting & Nonferrous Alloys. — 2010. — № 4. — P. 295–297.
 33. Компан Я. Ю., Шербинин Э. В. Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами. — М.: Машиностроение, 1989. — 272 с.
 34. Протокопилов И. В. Магнітокерівана електрошлакова плавка багатоконпонентних титанових сплавів: Дис... канд. техн. наук / НАН України; Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона. — Київ, 2006. — 178 с.
 35. Дудко Д. А., Рублевский И. Н. Электромагнитное перемешивание шлаковой и металлической ванны при электрошлаковом процессе // Автомат. сварка. — 1960. — № 9. — С. 12–16.
 36. Трошун И. П., Черныш В. П. Магнитное управление кристаллизацией при ЭШП // Свароч. пр-во. — 1965. — № 11. — С. 3–5.
 37. Разработка и исследование методов управления структурой кристаллизующегося слитка ЭШП путем наложения магнитного поля / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. И. Ус, С. В. Томиленко // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1989. — № 4. — С. 3–7.
 38. Компан Я. Ю., Назарчук А. Т., Протокопилов И. В. К вопросу интенсификации электромагнитного воздействия при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке титановых сплавов // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 4. — С. 3–7.
 39. Компан Я. Ю., Протокопилов И. В., Назарчук А. Т. Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка (МЭП) титановых сплавов с дискретными воздействиями магнитных полей // Материалы межд. конф. «Ti-2008 в СНГ» (18–21 мая 2008, С.-Петербург). — СПб, 2008. — С. 96–99.

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

Поступила 12.07.2011

Новости металлургии Украины

Одним из крупнейших предприятий Украины по производству стали, чугуна и проката является ОАО «Днепропетровский металлургический завод им. Петровского». Ежегодно завод производит 1,23 млн т стали и 1,8 млн т чугуна. По результатам 2007 года ОАО «Днепропетровский металлургический завод им. Петровского» понёс убытки с размере 14 млн грн.

В связи с убыточностью производства кислородно-конвертерный цех перевели на дуплекс-процесс, который предусматривает значительно большее количество операций, по сравнению с прежними технологиями. Но с другой стороны, дуплекс-процесс позволяет существенно снизить расход чугуна в процессе получения стали, а также в два раза сократить расход извести. Срок эксплуатации футеровки увеличивается при использовании методики дуплекс-процесса до 300 плавов.

Применение новой технологии требует увеличения расхода металлолома от 199 до 270 кг на тонну стали, но при этом в переработку идет металлолом более низкого качества.

Основным стимулом для перехода предприятия на технологию дуплекс-процесса является снижение затрат на производство стали. Использование методики дуплекс-процесса позволяет производить сталь последовательно в двух сталеплавильных агрегатах.

<http://www.kanwest-met.ru/>





УДК 669.187.526.001.57

ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЕ КОМПАКТИРОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

**В. А. Шаповалов, Ф. К. Биктагиров, В. Р. Бурнашев,
В. И. Колесниченко, В. В. Степаненко, Н. В. Рейда,
О. В. Карускевич, Д. В. Ботвинко**

Дан краткий анализ технологических схем изготовления прессованной заготовки из некомпактной шихты для последующего переплава. Показаны перспективность и экономическая целесообразность прессования некомпактной шихты путем сочетания процессов электронагрева и незначительных усилий прессования без использования мощного и дорогостоящего прессового оборудования. Описано устройство опытной установки, приведены пооперационная технологическая схема прессования некомпактной шихты и основные технологические параметры процесса.

Brief analysis of process flow charts of producing a pressed billet of non-compact charge for next remelting is given. Shown are the challenges and economic rationality of pressing the non-compact charge by combination of processes of electric heating and negligible forces of pressing without application of powerful and expensive press equipment. The design of a pilot installation is described, successive operational flow chart of pressing the non-compact charge and main technological parameters of the process are given.

Ключевые слова: компактирование; расходный электрод; пунсон; матрица; регенерация; металлооборот

Разработка новых энергосберегающих и дешевых технологий, а также соответствующего оборудования для создания замкнутого производства металлических материалов является весьма актуальной задачей.

Несмотря на довольно высокий уровень современного производства металлопродукции в процессе ее реализации образуется и накапливается огромное количество отходов, что обусловлено как особенностями технологии, так и техническими требованиями к готовой продукции. Учитывая, что за последние 40 лет образовался металлический фонд в размере около 40 млрд т, легко представить масштабы накопления вторичных ресурсов, которые необходимо направить в металлооборот. Особенно это касается дорогостоящих высокореакционных и тугоплавких металлов (титан, цирконий, ниобий и др.).

Так, например, при обработке титана резанием в стружку уходит до 40 % металла, а при производстве титанового литья выход годного для изделий ответственного назначения составляет всего лишь 20...25 % [1]. За последнее время после мирового экономического кризиса возобновляется повышен-

ный интерес к титану, отличающемуся комплексом уникальных свойств, делающих его почти незаменимым в таких стратегически важных отраслях, как нефтегазовая, авиакосмическая, химическая и др. Страна, производящая (а таковой является Украина), но не потребляющая титан, превращается в сырьевой придаток и титановый век для нее долго не наступит [2].

В основной же массе отходы (и не только титановые) представляют собой кондиционный металл, который целесообразно возвращать в производство для его оптимизации и соответствующего удешевления себестоимости готовой продукции, полностью замкнув тем самым металлооборот.

Следует отметить, что определенная часть отходов, особенно крупногабаритных, используется непосредственно в плавильных агрегатах без предварительной подготовки. Однако существует целая гамма металлических материалов (стружка, обрезь, проволока, гранулированные порошки, губка и др.), дальнейшее использование которых без предварительного компактирования или вообще невозможно, или крайне затруднено и требует недешевых дополнительных технологических операций.

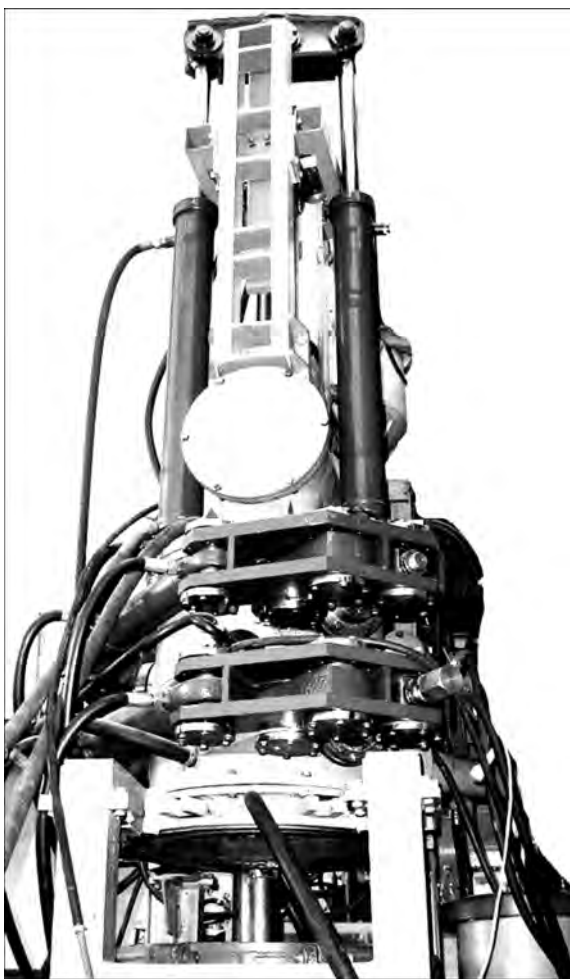


Рис. 1. Общий вид опытной установки компактирования металлических материалов

Поэтому проблема компактирования указанных материалов с целью их максимального вовлечения в металлооборот приобретает первостепенное значение, а необходимость ее решения является экономически обоснованной и целесообразной. Более того, попутно будет решена и немаловажная задача компактного транспортирования этих материалов к месту их дальнейшей переработки и рациональной загрузки в плавильные агрегаты.

Однако несмотря на обилие существующих новых способов компактирования металлических материалов (холодное прессование, спекание, штамповка, электроимпульсное брикетирование и пр.), они в силу ряда причин как технического, так и экономического характера не могут обеспечить получение качественных, крупногабаритных и дешевых компактных заготовок, пригодных для дальнейшего использования в металлообороте [3–6].

Среди основных недостатков нужно отметить следующие: ограниченная длина получаемой заготовки при прессовании в глухонднную матрицу, невысокая плотность брикета при электроимпульсном компактировании, недостаточная прочность, наличие трещин и кривизны заготовок при холодном прессовании. Более того, для получения массивных заготовок способом холодного прессования необхо-



Рис. 2. Заготовка, полученная из титановой стружки различных видов

димо создавать колоссальные механические усилия с удельным давлением прессования свыше 500 МПа, т. е. использовать крупногабаритное и дорогостоящее оборудование (10 млн дол. США).

В связи со сложившейся ситуацией в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины предприняли попытку решить эту проблему, в результате чего разработана уникальная, на наш взгляд, высокоэффективная технология компактирования металлических материалов, суть которой заключается в совмещении процессов прессования и электротермического нагрева. Такое сочетание позволяет повысить пластичность компактируемого в специальной матрице материала и существенно (на 2 порядка) уменьшить усилия прессования. При этом исключается ряд технологических операций, характерных для традиционных схем прессования (вакуумный отжиг, сварка и т. п.), повышается качество получаемых заготовок.

К преимуществам предлагаемой технологии, по сравнению с зарубежными аналогами, следует отнести возможность получения длинномерных и крупногабаритных заготовок, поскольку процесс реализуется в проходной матрице с подводом тока непосредственно на формируемую заготовку, что в свою очередь сокращает электрические потери, повышает КПД и, соответственно, производительность процесса компактирования.

Процесс осуществляется порционно в полунепрерывном режиме, а нагрев каждой порции выполняют в два этапа: на первом — до температуры десорбции газовых и редкофазных загрязнений, на втором — до температуры горячей деформации обрабатываемого материала, что способствует повышению качества изделий и эффективности компактирования.

Особенно эффективна технология для компактирования дорогостоящих металлов и сплавов с высокими значениями прочности и модуля упругости. При этом получают заготовки как сплошные, так и полые, которые в дальнейшем можно использовать в компактном виде в качестве переплавных электродов, лигатур, раскислителей и т. д. в любых плавильных агрегатах.

Предложенную технологию отрабатывали на специально созданной для этого опытной установке, общий вид которой приведен на рис. 1. Были

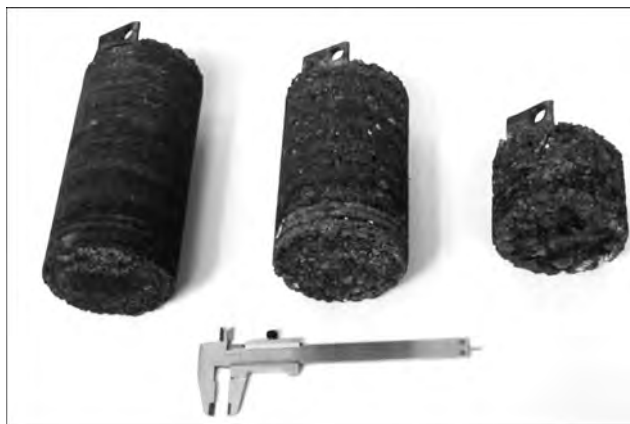


Рис. 3. Заготовки, скомпактированные из титановой губки разных фракций

определены оптимальные технологические параметры компактирования разнообразных металлических материалов (сталь, чугун, алюминий, жаропрочные сплавы, титан и др.), отличающихся по физическим свойствам (удельному весу, тепло- и электропроводности) [6–8]. При этом использовали разные размерность и гранулометрический состав материалов.

На рис. 2 показан общий вид комбинированной заготовки, скомпактированной из титановой стружки различных видов и размеров, а на рис. 3 — четыре отдельные заготовки, полученные из трех фракций губчатого титана: 2... 5; 5... 12 и 10... 30 мм. Рис. 4 демонстрирует заготовки из мелкой (ШХ16СГ) и крупной стружки жаропрочного сплава ЭП609-Ш.

В процессе исследований установлено, что полученные заготовки являются весьма прочными, что подтверждается воздействием на образцы ударной нагрузки 6,5... 7,0 МПа, а их плотность составляет 70... 75 % теоретической (плотность монолитного металла), что достаточно для использования в качестве расходных заготовок при дальнейшем переплаве.

Установлено, что с уменьшением гранулометрического состава любого металлического материала увеличивается плотность скомпактированных заготовок, что объясняется наличием большего количества точек соприкосновения между мелкими частицами и, как следствие, более эффективным прогревом и локальным подплавлением в ходе компактирования. С увеличением размеров фракции необходимо несколько повышать уровень подводимого тока и время нагрева каждой порции для достижения гарантированной плотной структуры.

В процессе освоения технологии возникали определенные сложности, которые требовали как конструкторских, так и технологических доработок. К примеру, нужно было устранить затруднения с подачей в зону компактирования крупной (без предварительного измельчения) и витой стружки, усовершенствовать электрическую схему (наличие од-



Рис. 4. Заготовки, скомпактированные из 100 % мелкой стальной стружки стали ШХ15СГ (а) и крупной стружки жаропрочного сплава ЭП609-Ш (б)

ного источника нагрева приводило к некоторой асимметричности компактирования), минимизировать вероятность возникновения электродугового разряда в условиях подвижного токоподвода к формируемой (компактируемой) заготовке и пр.

Накопленный опыт и выявленные закономерности при проведении экспериментов на опытной установке позволяют приступить к разработке более совершенного высокопроизводительного опытно-промышленного оборудования для компактирования качественных и экономичных длинномерных заготовок со стабильными физико-механическими свойствами по всему сечению из разнообразных металлических материалов, таких как стружка, губка, порошки, гранулы, кусковая обрезь и пр.).

Технические характеристики установки электротермического компактирования

Компактируемый материал	титан, цирконий, сталь, жаропрочные сплавы
Вид шихты	стружка, губка, порошок, обрезь
Размер скомпактированных заготовок (электродов), мм:	
диаметр.....	200, 500
высота	3000
Плотность полученных заготовок, % от теоретической (плотности монолита) ..	70... 75
Удельные усилия прессования, МПа	5
Плотность тока, А/мм ²	1,5
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/кг	0,8... 1,2
Дозирование и подача компактируемого материала в матрицу	кассетная подача из ячеечного бункера
Атмосфера при компактировании	нейтральная (аргон) вакуум, воздушная среда
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	20
Давление охлаждающей воды, МПа	0,4
Производительность установки, т/год	3000

В заключение следует подчеркнуть, что промышленное внедрение предложенной технологии и соответствующего оборудования позволит создать замкнутый (полный) цикл возврата в производство дорогостоящих вторичных ресурсов, что особенно актуально для крупных металлургических и машиностроительных предприятий. Срок окупаемости оборудования составит 8... 12 мес в зависимости от стоимости компактируемых материалов.

1. *Регенерация отходов титанового литья в авиационном моторостроении* / Б. Е. Патон, В. И. Лакомский, В. Н. Костяков и др. // Спец. электрометаллургия. — 1974. — № 24. — С. 96–102.
2. *Полькин И. С.* Перспективные направления исследований в области производства и применения титановых сплавов Ti-2005 в СНГ. — Киев, 2005. — С. 20–30.
3. *Плавка и литье титановых сплавов* / Н. Ф. Аношкин, С. Г. Глазунов, Е. И. Морозов, В. В. Тетюхин. — М.: Металлургия, 1978. — 383 с.

4. *Горячая штамповка и прессование титановых сплавов* / Л. А. Никольский, С. З. Фиглин, В. В. Бойцов и др. — М.: Машиностроение, 1975. — 285 с.
5. *Абрамова К. Б., Самуйлов С. Д., Фиглин Ю. А.* Брикетирование титановой стружки под воздействием коротких импульсов электрического тока // Цв. металлы. — 1998. — № 12. — С. 70–74.
6. *Получение расходуемых электродов компактированием титановой губки под током* / М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, В. С. Константинов и др. // Современ. электрометаллургия. — 2005. — № 3. — С. 64–67.
7. *Переработка стружки жаропрочной стали ЭП609-III способом компактирования под током с последующим электрошлаковым переплавом* / В. А. Шаповалов, В. Р. Бурнашев, Ф. К. Биктагиров и др. // Там же. — 2009. — № 3. — С. 43–45.
8. *Пат. 7997 Україна, МПК С 22 В 1/248.* Спосіб компактування металеві шихти / Б. Е. Патон, М. Л. Жадкевич, В. О. Шаповалов та інші. — Опубл. 10.08.2007; Бюл. № 12.

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

Поступила 23.09.2011

ВСМПО-Ависма и Boeing развивают сотрудничество

Ural Boeing Manufacturing (UBM), совместное предприятие Boeing и ВСМПО-Ависмы, поставило первую партию балок основной опоры шасси самолета Next-Generation 737.

Балка основной опоры шасси самолета Next-Generation 737 является составной частью конструкции крыла, поддерживающей крепление опоры шасси. Она состоит из двух частей — по одной для каждого крыла. UBM надлежит производить первичную обработку штамповок, полученных от ВСМПО-Ависмы, которые затем будут отправляться на завод Boeing в Портленде для окончательной механической обработки. Обеспечивая около половины всего объема первичной обработки балки основной опоры шасси, необходимой для 737, производство на UBM дает возможность заводу в Портленде поддерживать производственные мощности в соответствии с увеличивающимся объемом выпуска Next-Generation 737.

С 1997 г., когда Boeing заключила свой первый контракт с российским производителем титановой продукции, ВСМПО-Ависма является партнером Boeing и поставщиком штамповок и титановых деталей посредством ряда долгосрочных договоров.

Компании уже имеют опыт успешного сотрудничества. Ряд титановых деталей для новейшего самолета 787 Dreamliner произведены с использованием сплава, совместно разработанного и интегрированного специалистами Boeing и ВСМПО-Ависмы.



Источник фото: itar-tass.com

В июле 2009 г. компании Boeing и ВСМПО-Ависма открыли совместное предприятие Ural Boeing Manufacturing, расположенное в Верхней Салде Свердловской области. UBM — это новое современное предприятие, осуществляющее механическую обработку титановых штамповок для Boeing 787 Dreamliner, самого технологичного самолета в мире.

В ближайшие 30 лет компания Boeing намерена реализовать в России проекты общей стоимостью в \$27 млрд.

<http://www.boeing.ru/>

ЭШП ЭЛЕКТРОДОВ, СПРЕССОВАННЫХ ИЗ СТРУЖКИ АУСТЕНИТНЫХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

В. А. Шаповалов, В. Р. Бурнашев, Ф. К. Биктагиров,
А. П. Игнатов, Г. Ф. Мьяльница, В. В. Степаненко,
М. А. Брагин, В. Н. Пудиков, Д. В. Подъячев,
Д. В. Ботвинко, Д. М. Жиров, А. В. Гнатушенко

Определены оптимальные технологические параметры компактирования аустенитной нержавеющей стружки в электроды для ЭШП. показана зависимость плотности электрода от гранулометрического состава стружки. Установлены оптимальные режимы ЭШП спрессованных электродов. Изучено качество полученного металла.

Optimum technological parameters of compacting the austenite stainless chips into electrodes for ESR are defined. The dependence of electrode density on granulometric composition of chips was established. The optimum conditions of ESR of pressed electrodes were found. The quality of obtained method was studied.

Ключевые слова: стружка аустенитных нержавеющей сталей; прессование под током; электроды ЭШП; качество слитков

Среди нержавеющей сталей широкое распространение в промышленности получили аустенитные стали типа 18-10. Оценивая энергозатраты производства аустенитной нержавеющей стали за весь ее жизненный цикл, авторы работы [1] установили, что в случае использования исходных материалов при производстве 17 млн т / год без добавления вторичного сырья потребуется 9·10¹⁷ Дж первичной энергии, а это приводит к выбросу 61 млн т СО. Частичное использование лома при выплавке стали позволяет снизить расход энергии на 33 % (до 4,4·10¹⁷ Дж) и выброс СО на 32 % (до 29 млн т). Если же при производстве стали использовать только ее отходы (скрап), то потребление энергии снижается на 67, а выброс СО — на 70 %.

Из этого следует, что переработка отходов нержавеющей сталей не только экономически выгодна, но и целесообразна экологически. Наиболее сложной в данном процессе является переработка стружки. Для ее переплава требуется предварительное компактирование как для уменьшения угара и безвозвратных потерь, так и для удобства транспортировки и загрузки в плавильный агрегат.

Существуют различные способы компактирования металлов (гидростатическое холодное электроимпульсное прессование, уплотнение взрывом, спеканием, штамповкой и прокаткой), которые, однако, не позволяют с высокой степенью эффективности готовить к переработке стружку высоколегированных сталей и сплавов, в том числе нержавеющей [2, 3].

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан способ и создана опытно-промышленная установка для компактирования стружки способом полунепрерывно-

го горячего прессования [4–6]. Эксперименты по прессованию различных материалов (титановая губка, стружка стали ЭП-609, чугуна, алюминия и др.) показали перспективность утилизации металлических отходов предложенным способом.

Достоинством разработанного способа компактирования шихты под током, помимо возможности получения длинномерных заготовок, является угар из стружки остатков смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) при нагреве прессуемого металла до высоких температур. Это позволяет использовать стружку без предварительной очистки от органических остатков механической обработки.

Стружка из смеси аустенитных сталей типа Х18Н9 и Х18Н10Т поставлялась предприятием «Зоря»–«Машпроект» (г. Николаев). После дробления ее не промывали для удаления остатков СОЖ, а подвергали прессованию на заготовки диаметром 100 мм и длиной до 1000 мм. Режимы прессования следующие: электрический ток, пропускаемый через шихту, составлял 10... 12 кА, прикладываемое напряжение — 12... 17 В. Масса одной порции стружки, загружаемой в матрицу установки прессования, равнялась 650 г, длительность ее прессования — 3 с, удельный расход электроэнергии — 0,5... 1,0 кВт·ч/кг.

Отдельные порции стружки в процессе компактирования нагревались до температуры размягчения, а местами — до жидко-твердого состояния и при усилии прессования до 2,5 МПа надежно соединялись между собой. В итоге получалась длинномерная сварно-спрессованная заготовка, которая служила в качестве расходного электрода при ЭШП. В случае необходимости заготовки сваривали между собой способом ручной сварки для получения расходных электродов для ЭШП длиной до 1800 мм (рис. 1).

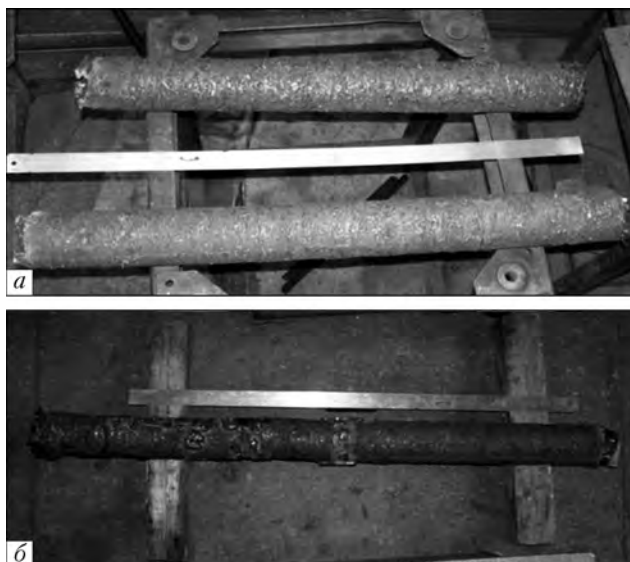


Рис. 1. Получение электродов: *a* — спрессованного ($L = 1000$ мм); *б* — собранного из двух прессовок ($L = 1880$ мм)

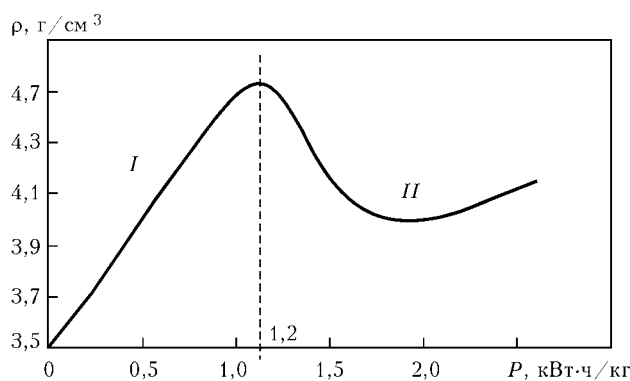


Рис. 2. Зависимость плотности ρ спрессованной заготовки от удельного расхода электроэнергии P : *I* — мелкая стружка 10... 25 мм; *II* — крупная стружка 25... 70 мм

Плотность спрессованных из стружки нержавеющей сталей электродов колебалась от 3,9 до 4,75 кг/см³, что составило 54... 64 % плотности литого металла. Причем плотность скомпактированного металла во многом зависит от степени измельчения стружки. При прессовании более мелкой стружки она выше (рис. 2). Из этого рисунка видно, что для стружки размером 10... 25 мм оптимальным является расход электроэнергии на прессование, составляющий око-



Рис. 3. Электрошлаковый переплав спрессованных электродов

ло 0,5... 0,7 кВт·ч/кг. Дальнейшее увеличение тока и времени прессования с экономической точки зрения нецелесообразно.

Скомпактированную в электроды стружку нержавеющей стали переплавляли способом ЭШП в кристаллизаторе диаметром 175 мм. Плавки осуществляли по двум схемам: в глухонный кристаллизатор и с вытягиванием слитка из кристаллизатора.

В процессе ЭШП применяли шлаки АНФ-6 или смесь шлаков АНФ6 и АН-295 в соотношении 1:2 и поддерживали следующие режимы: $I = 2,0... 3,5$ кА, $U = 37... 47$ В (рис. 3). Производительность переплава составила 1,3... 1,9 кг/мин.

В результате переплава получена опытно-промышленная партия слитков общей массой 350 кг (рис. 4). Масса слитков колебалась от 35 (выливка



Рис. 4. Внешний вид опытно-промышленной партии слитков из нержавеющей стали, выплавленных из спрессованных электродов

Таблица 1. Химический состав выплавленной нержавеющей стали

№ слитка	Массовая доля элементов, %						Содержание газов, %		
	Ni	Cr	Ti	Si	Mn	C	[O]	[N]	[H]
1	9,8	17,0	0,3	0,67	1,3	0,11	0,016	0,049	0,0003
2	10,0	18,5	0,99	0,63	1,4	0,12	0,013	0,42	0,0003
3	10,4	18,4	0,24	0,61	0,57	0,15	0,016	0,039	0,0004
ГОСТ 977–98	8... 11	17... 20	5С–0,7	–	≤2,0	≤0,12	–	–	–

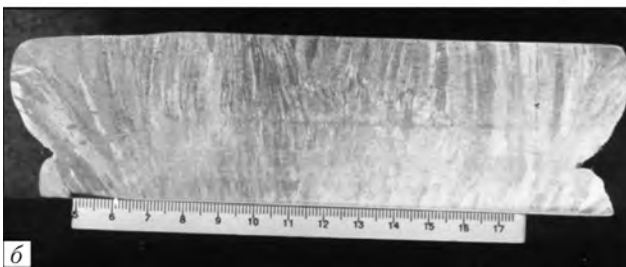
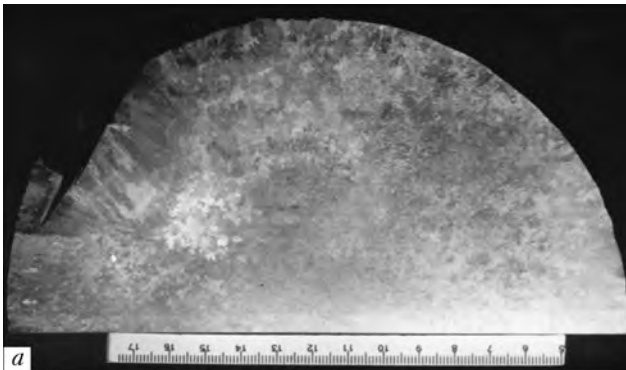


Рис. 5. Макроструктуры поперечного (а) и продольного (б) сечения слитков ЭШП нержавеющей стали

в глухонный кристаллизатор) до 62 кг (с вытягиванием слитка).

Из выплавленных слитков для изучения качества полученного металла, определения химического состава и металлографического анализа отобраны образцы.

Из табл. 1 видно, что содержание элементов в выплавленном металле имеет отклонения от химического состава стали марки 12Х18Н9Т по углероду, титану. Связано это с тем, что при переработке использовали смесь стружки титансодержащей стали Х18Н10Т и безтитановой стали 12Х18Н9. Металлографические исследования темплетов, вырезанных из донной (рис. 5, а) и средней (рис. 5, б) частей слитка, установили, что металл плотный, без видимых дефектов.

Механические испытания образцов выплавленной стали показали, что ее свойства находятся в пределах требований ГОСТ 977–88 (табл. 2).

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что переработка стружки путем ее прессования в расходный электрод с последующим ЭШП такого электрода позволяет из 100 % стружки получать качественный металл, а предложенная схема является эффективной ресурсосберегающей технологией.

Таблица 2. Механические свойства металла слитков нержавеющей стали 12Х18Н9Т

Металл	σ_T	σ_B	δ	Ψ	KCU_{γ_2} кДж/м
	МПа		%		
Выплавленный из стружки	229,1	468,7	50,9	64,3	800
Требования ГОСТ 977–88	≥196	≥441	≥25	У32	У590

Выводы

1. Проведенные исследования компактирования стружки из нержавеющей стали показали, что эффективным способом получения длинномерных электродов является комплексный способ электронагрева шихты с одновременным прессованием.
2. Определены оптимальные технологические параметры компактирования стружки.
3. Получены электроды диаметром 100 мм, длиной до 1800 мм из нержавеющей стали для их последующего переплава способом ЭШП.
4. Установлено, что плотность электродов зависит от гранулометрического состава стружки (чем мельче стружка, тем выше плотность электрода).
5. Определены оптимальные параметры ЭШП полученных электродов. Изучено качество выплавленного металла.

1. *The energy benefit of stainless steel recycling* / J. Jeremiah, B. K. Reck, T. Wang et al. // Реф. ж-л. Металлургия. Энергетические выводы переработки нержавеющей стали. — 2009. — № 1. — С. 15–10.
2. *Абрамова К. Б., Самуилов С. Д.* Метод брикетирования металлической стружки // Рынок вторичных металлов. — 2005. — № 2. — С. 50–54.
3. *Степанов С. И.* Исследование процесса горячего прессования и свойств деталей из стальной стружки: Автореф. дис... канд. техн. наук. — Киев, 1967. — 22 с.
4. *Получение расходных электродов компактированием титановой губки под током* / М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, В. С. Константинов и др. // Современ. электрометаллургия. — 2005. — № 3. — С. 64–67.
5. *Пат. 7997* Україна, МПК С22 В 1/248. Спосіб компактування металевої шихти / Б. Є. Патон, М. Л. Жадкевич, В. О. Шаповалов та інш. — Опубл. 10.08.2007; Бюл. № 12.
6. *Переработка стружки жаропрочной стали ЭП609Ш способом компактирования под электрическим током с последующим электрошлаковым переплавом* / В. А. Шаповалов, В. Р. Бунашев, Ф. К. Биктагиров и др. // Современ. электрометаллургия. — 2009. — № 3. — С. 43–45.

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

Поступила 23.09.2011



НА ШЛЯХУ ДО ІННОВАЦІЙНИХ ЛІКАРСЬКИХ ПРЕПАРАТІВ

Товариство з обмеженою відповідальністю «Нано Технології в Медицині» (ТОВ «НаноМедТех») створено у грудні 2009 р. з приватної ініціативи за підтримки президента Національної академії наук України академіка Б. Є. Патона для виконання передових досліджень і розробок в області нано- та нанобіотехнологій, спрямованих на створення інноваційних лікарських препаратів і систем діагностики.

Унікальним в ТОВ «НаноМедТех» є тісна взаємодія різних наукових груп та інтегрованість їх досліджень для вирішення складних медико-біологічних проблем. Компанія робить ставку на міждисциплінарні дослідження, які дозволять краще розуміти властивості нанорозмірних матеріалів та різні аспекти їх взаємодії зі складними за своєю природою біологічними системами. Внаслідок наших досліджень будуть створені нові технології та методи діагностики і лікування хвороб. Для проведення наукових досліджень та розробок використовується унікальне аналітичне та технологічне обладнання.

Лабораторія фізико-хімічного аналізу наноматеріалів компанії забезпечує аналітичну підтримку роботи технологічних підрозділів «НаноМедТех», проводячи характеристизацію нанооб'єктів, наноматеріалів та наноструктур з використанням сучасного наукового обладнання та передових методів і методик. Використовуються методики, стандартизовані за ДСТУ, ISO та їх модифіковані аналоги.

Для організацій та приватних осіб на комерційній основі лабораторія надає послуги з проведення дослідних та контрольних випробувань.

В лабораторії зосереджено найсучасніше аналітичне обладнання, що перекриває весь спектр наукових та інженерних досліджень (від нанотехнологій до технологій виробництва) та потужний людський капітал.

До матеріально-технічної бази лабораторії входять електронний скануючий мікроскоп Tescan Mira 3 LMU, атомно-емісійний спектрометр для хімічного аналізу Shimadzu ICPE-9000, прилад для вимірювання розміру частинок Malvern Zetasizer Nano-ZS, спектрофотометр Shimadzu UV-3600 та системи приготування проб зразків.

Лабораторія колоїдної хімії створює агрегативно стійкі колоїдні системи, що мають застосування в біології, медицині, сільському господарстві. Для цього використовується метод диспергування та стабілізації у водному середовищі продуктів електронно-променевого осадження, а також класичні методи хімічної конденсації. Розроблено методики, що дозволяють отримувати, залежно від умов синтезу та застосованих стабілізаторів, колоїдні системи з наночастинками різного розміру — від 5 до



Електронний скануючий мікроскоп Tescan Mira 3 LMU



Атомно-емісійний спектрометр для хімічного аналізу Shimadzu ICPE-9000

50 нм. Наявне в лабораторії обладнання дозволяє всебічно охарактеризувати отримані системи. Один з напрямків роботи лабораторії полягає в отриманні колоїдних розчинів срібла та золота, що пов'язано з їх застосуванням в біології та медицині.

Успішно проводяться дослідження бактерицидних властивостей і протівірусної активності отриманих препаратів.

Основні задачі лабораторії такі:

розробка нових методів отримання агрегаційно-стійких колоїдних систем для застосування в медицині, фармацевтиці, сільському господарстві тощо, а також колоїдних наночастинок металів, колоїдних систем наночастинок металів-біомолекули, наночастинок металів-лікарський препарат, люмінесцентних квантових точок та їх кон'югатів з біомолекулами;

дослідження довготривалої стабільності отриманих колоїдних систем та впливу на них фізичних факторів;

масштабування розроблених технологій до рівня напівпромислового (1... 10 л) та промислового (понад 100 л) синтезу, розробка технологічних регламентів для синтезу колоїдних препаратів.



Використовуються методи як диспергування і стабілізації у водному середовищі продуктів електронно-променевого осадження, так і класичні хімічного синтезу.

Розроблені оригінальні методики синтезу колоїдних наночастинок срібла та золота розміром 5... 50 нм в біологічно сумісних середовищах.

Успішно провадяться дослідження бактерицидних властивостей і противірусної активності отриманих препаратів.

Електронно-променева технологія одержання наночастинок металів у водорозчинній матриці базується на одночасному випаровуванні електронним променем у вакуумі металу та матеріалу матриці з подальшою їх конденсацією на підкладці.

Технологія дозволяє отримувати наночастинки розміром від 15 до 100 нм. Переваги технології полягають в можливості синтезу наночастинок в неорганічних матрицях, комбінованих наночастинок, що складаються з атомів кількох металів, наноструктурованих композиційних матеріалів. Технологія захищена патентами України. Для реалізації даної технології міжнародний Центр електронно-променевих технологій Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України розробив та виготовив для ТОВ «НаноМедТех» сучасну двокамерну установку.

Розроблено такі оригінальні запатентовані технології хімічного синтезу:

колоїдних розчинів золота і срібла з наперед заданим розміром наночастинок в діапазоні 2... 100 нм в різних середовищах (в тому числі біологічно сумісних);

колоїдних розчинів діоксиду церію;

нанорозмірних гібридних матеріалів CeO_2 -алюмосилікатні нанотрубки.

Серед розробок компанії — продукти у вигляді мікропорошку з наночастинками срібла, міді, заліза; колоїдні розчини золота і срібла; кристалічні порошки CeO_2 , отримані способом електронно-променевого випаровування в вакуумі.

Розмір наночастинок металу становить 20... 100 нм. Можуть бути використані в промисловості, сільському господарстві, фармації.

Проводяться розробки нових органічних мікродобрив класу халатів на базі природних фрагментів дікарбонових і оксикислот, біологічно активних металів (залізо, мідь, магній, цинк, марганець, кобальт). Їх області застосування такі:

насінництво — стимуляція утворення насіння медоносних, кормових і технічних культур (некореневе підживлення підвищує врожайність насіння на 20... 60 %, нектаропродуктивність — на 20... 100 %);

виноградарство, садівництво;

антихлорозний засіб і засіб проти опадання плодів цитрусових (збільшення вмісту цукру в плодах на 25... 40 %);

квітникарство — підвищення виходу декоративної квіткової продукції, вирощуваної гідропонним способом (кореневе і некореневе підживлення підвищує сортність до 70... 80 % еліти, вихід зрізу зростає на 30... 40 %);

Нанотехнології для сільського господарства. Ми розробляємо екологічно безпечні нанопрепарати для позакореневого підживлення, регуляції росту і захисту рослин; передпосівної обробки та захисту насіння; регуляції росту тварин і птиці; поліпшення якості кормів.

Нанопрепарати відіграють роль мікродобрив, що підвищують накопичення біологічно-активних речовин у рослинах, забезпечуючи підсилення їх стійкості проти несприятливих погодних умов.

Препарати на основі наночастинок срібла використовуються як засіб захисту рослин від різних патогенних мікробів, вірусів та грибків. Окрім того, срібло є ультрамікроелементом, що відповідає за поліпшення комплексного живлення рослин, підвищення стійкості культур проти несприятливих кліматичних умов и стресів, сприяє боротьбі з хворобами та шкідниками.

Залізо у вигляді наночастинок проникає через поверхню листка в клітину рослини, де трансформується в активні ферментні форми і яка відповідає за фотосинтез та інші окислювально-відновлювальні процеси.

Розроблені компанією біоцидні препарати, в яких присутні наночастинки металів, протидіють патогенній мікрофлорі без порушення генома спадковості, цілеспрямовано регулюються процеси метаболізму поживних речовин і підвищують продуктивність тварин за рахунок підвищення засвоюваності кормів. Метали у вигляді наночастинок, поряд з високим бактерицидними властивості, мають істотно меншу токсичність, у порівнянні з солями металів, і не накопичуються в організмі людини і тварин.

Застосування фільтрів з наночастинками металів є дуже привабливим для інгібування процесів бродіння при очищенні соків, молока та іншої рідкої продукції.

Наномедицина і нанофармакологія. Компанія створює функціоналізовані наночастинки, здатні виконувати певні функції в біологічних системах. Наприклад, їх можна легко відстежити в організмі за флуоресценцією, вони можуть мати суперпарамагнітні властивості, розсіювати світло. Це дозволяє використовувати їх для діагностики захворювань, адресної доставки та контрольованого вивільнення лікарських препаратів, терапії. Ми досліджуємо можливість використання «чистих» і функціоналізованих неорганічних наночастинок для терапії та діагностики; можливості підвищення ефективності традиційних ліків за рахунок наночастинок (синергізм).

Наприклад, наночастинки срібла проявляють антивірусні, антибактеріальні та ранозагоювальні ефекти, наночастинки золота — протизапальні, а наночастинки CeO_2 мають яскраво виражені антиоксидантні, коригуючі та регенеративні властивості і можуть стати основою нового покоління антиоксидантних препаратів.

В. С. Єфанов



3-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «HIGH MAT TECH»

3–7 октября в Киеве состоялась 3-я Международная материаловедческая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения выдающегося ученого В. Н. Еременко. Организаторами конференции выступили Национальная академия наук Украины, Фонд фундаментальных исследований Украины, Украинское материаловедческое общество, НТУУ «Киевский политехнический институт», Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Национальный информационный центр по РПВ в Украине, ООО «ИНТЕМ» (Украина). Информационными партнерами конференции были журналы «Вестник украинского материаловедческого общества» (Украина), «Порошковая металлургия» (Украина), «Наноструктурное материаловедение» (Украина), «Деформация и разрушения» (Россия).

Конференция проходила под патронатом Федерации европейских материаловедческих обществ, Европейского материаловедческого общества (EUREKA), Европейской ассоциации порошковой металлургии, Alloy Phase Diagram International Commission, Materials Science International Team (Германия). Конференцию спонсировали: Фонд фундаментальных исследований Украины, НТУУ «Киевский политехнический институт», Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, U.S. Army International Technology Center E Atlantic (USAITC-A).

В работе конференции принимали участие около 200 ученых, инженеров, преподавателей, научных работников, аспирантов и студентов из ведущих мировых научно-исследовательских центров, университетов, НИИ, академий, научно-промышленных объединений из 20 стран.

Конференцию открыли академики НАН Украины В. В. Скороход и С. И. Сидоренко. Они пожелали всем участникам успешной и плодотворной работы, делового сотрудничества, поставили задачи конференции и изложили организационные вопросы.

Конференция состояла из двух секций. Тематика первой секции: фундаментальные основы современного материаловедения; диаграммы состояния; поверхностные явления и высокотемпературная капиллярность; моделирование технологических процессов получения материалов и свойств современных материалов; порошковая металлургия; новейшие материалы на основе дисперсных частиц (порошков, волокон и др.), свойства, технологии; металлические материалы и технологии их получения и обработки; наноматериаловедение, технологии и материалы.

Тематика второй секции: новейшие разработки в области создания полимерных материалов с улучшенными характеристиками и G-композиционные материалы; керамика функционального и конструкционного назначения; оборудование и методики для оценки свойств материалов; материалы медицинского назначения.

Ряд докладов, в частности оригинальное решение материаловедческих задач путем использования нанотехнологий и наноматериалов, вызвал оживленные дискуссии.

Некоторые доклады, заинтересовавшие участников конференции, были посвящены получению новых конструкционных и функциональных материалов путем применения сварочных и родственных технологий, например «Электронно-лучевая технология твердо- и жидкофазных медицинских субстанций с наноразмерной структурой» Б. А. Мовчана (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины); «К деградации металла паропроводов ТЭС» В. В. Дмитрика, С. Н. Барташ (НТУ «ХПИ», УИПА, Харьков); «Актуальные проблемы пайки жаропрочных никелевых сплавов» В. Ф. Хорунова, С. В. Максимовой (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины); В. С. Журавлева «О применении ниобия в металлических расплавах для управления смачиванием ими металлов и пайкой неметаллических материалов на основе оксидов, нитридов и углерода» (Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев); «Термодинамика жидкофазного спекания композиционных материалов» А. Ф. Лисовского (Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, Киев); «Современное лабораторное и промышленное электронно-лучевое оборудование для плавки металлов и сплавов, получение композиционных материалов и нанесение покрытий» В. В. Скорохода, Н. И. Гречанюка, Р. В. Минакова и др. (Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины Киев, НПП «Электротяжмаш», Винница); «Диффузионная сварка разнородных материалов: технология и оборудование» А. В. Люшинского (ОАО «Раменское приборостроительное КБ», Раменское, Россия); «Гибридное лазерно-плазменное напыление покрытий на основе титана в среде азота» Ю. С. Борисова, С. Г. Войнаровича, А. Н. Кислицы и др. (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины); «Технология получения ионно-плазменных покрытий стехиометрического состава на изделиях из инструментальных материалов» В. В. Бендункевича (ФГОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова», Чебоксары, Россия) и др.

Следует отметить существенно возросшее количество докладов, посвященных различным способам нанесения покрытий, в том числе сделанных учеными ИЭС им. Е. О. Патона. Наряду с устными докладами были представлены и стендовые — всего 230 докладов и устных сообщений.

Уровень организации конференции был высоким, о чем свидетельствует возросшее, по сравнению с прошлой конференцией, количество ее участников.

В течение работы конференции ее участники обменялись информацией, обсудили пути эффективного решения материаловедческих проблем, установили деловые контакты, определили задачи для совместного решения.

При подведении итогов конференции участники отметили ее актуальность и полезность, наметили перспективы дальнейшего научного сотрудничества.

В. В. Дмитрик



НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ

К 85-летию со дня рождения В. И. Лакомского



В октябре исполнилось 85 лет Виктору Иосифовичу Лакомскому — известному ученому в области специальной электрометаллургии и сварки, члену-корреспонденту Национальной академии наук Украины, доктору технических наук, профессору, лауреату Государственной премии Украины, заслуженному деятелю науки и техники.

В. И. Лакомский родился 11 октября 1926 г. в городе Краматорске Донецкой области. В 1945 г. он окончил металлургический техникум в г. Новокузнецке Кемеровской области, а в 1950 г. — Запорожский машиностроительный институт.

После окончания аспирантуры при Киевском политехническом институте в 1954 г. он защитил кандидатскую диссертацию и пришел в Институт машиноведения и сельхозмеханики, где работал в должности ученого секретаря.

С 1957 г. по настоящее время В. И. Лакомский трудится в Институте электросварки им. Е. О. Патона. В 1969 г. Виктор Иосифович защитил докторскую диссертацию, в 1971 г. утвержден в ученом звании профессора. В период с 1975 по 1979 гг. был заместителем директора по научной работе института «УкрНИИИспецсталь». В 1998 г. ему присвоено звание Заслуженного деятеля науки и техники.

Глубокие и обстоятельные научные исследования В. И. Лакомского в различных областях техники (металлургии, сварки, материаловедения и т. д.) снискали ему заслуженное признание и высокий научный авторитет. Он является автором оригинальных тонких методик исследования равновесия системы газ–жидкий металл при различных способах нагрева в широком диапазоне температур: от точки плавления до точки кипения металлов.

В. И. Лакомский впервые экспериментально обнаружил и теоретически обосновал существование явления плазменно-химического поглощения газов металлами, а также доказал возможность легирования металла азотом в широком диапазоне концентраций непосредственно из газовой фазы.

Благодаря этим работам создано и с успехом развивается целое научное направление — иссле-

дование закономерностей высокотемпературного взаимодействия газов, находящихся в обычном колебательном и возбужденном дугой и плазмой состоянии, с жидкими металлами. Именно такой научный подход к решению реальных технических задач позволил в короткий срок разработать теоретические основы, технологию и оборудование, а также внедрить в промышленность один из способов специальной электрометаллургии — плазменно-дуговой переплав металлов и сплавов. Эта работа, проводившаяся под руководством академика Б. Е. Патона, была отмечена в 1980 г. Государственной премией Украины.

Разработка принципиально новых самоспекающихся термохимических катодов и на их основе электродуговых источников тепла (дуготронов) способствовала созданию уникальной технологии дуговой сварки открытой дугой черных и цветных металлов с углеродными материалами. Эта технология успешно используется при изготовлении многоамперных контактных узлов электрометаллургических и электротермических агрегатов как в Украине, так и за рубежом.

Нынешний этап научной деятельности В. И. Лакомского связан с изучением физических свойств и технологических аспектов производства термоантрацита, что позволяет изменить конструкцию электрокальцинаторов и технологию производства термоантрацита.

Профессор В. И. Лакомский является организатором ряда научных подразделений института. В 1958 г. он создал лабораторию газов в металлах, в 1968 г. — отдел плазменной металлургии, в 1979 г. — Запорожский отдел Института электросварки, а в 1995 г. — научно-инженерный центр плазменной технологии.

Виктор Иосифович проводит большую работу по воспитанию научных кадров. Под его руководством подготовлено 11 кандидатов наук. Он принимает активное участие в научной жизни, выступает с докладами и лекциями, является членом редколлегии журнала «Современная электрометаллургия».

В. И. Лакомский опубликовал свыше 500 научных трудов, среди которых более 300 статей, 8 монографий и примерно 200 авторских свидетельств и патентов, полученных в различных странах мира.

Профессор В. И. Лакомский полон творческих сил и энергии, направленных на поиск новых оригинальных решений задач, стоящих перед специальной металлургией и сваркой.



В. И. Махненко — 80

В октябре академику НАН Украины Владимиру Ивановичу Махненко исполнилось 80 лет. После окончания Одесского института инженеров морского флота в 1955 г. он начал трудовую деятельность на судоремонтном заводе в г. Архангельске. Поступив в аспирантуру и успешно защитив кандидатскую диссертацию, В. И. Махненко в 1964 г. пришел в Институт электросварки им. Е. О. Патона. Здесь в 1973 г. он защитил докторскую диссертацию, в 1978 г. был избран членом-корреспондентом, в 1990 г. — академиком НАН Украины. Жизненный путь В. И. Махненко связан со сварочной наукой. Это годы плодотворных фундаментальных исследований, когда в полной мере проявились его неиссякаемое трудолюбие, целеустремленность, чувство нового, научная интуиция. С 1975 г. Владимир Иванович возглавляет в институте отдел математических методов исследования физико-химических процессов сварки и спецэлектрометаллургии. В. И. Махненко вместе с учениками создана хорошо известная в стране и за рубежом школа по математическому моделированию тепловых, диффузионных, деформационных, электромагнитных и других физических явлений в сварке и родственных технологиях. Широкую известность получили исследования В. И. Махненко по кинетике многоосных сварочных напряжений и деформаций при сварке пластин, оболочек, стержневых систем, по расчету взаимодействия сварочных напряжений и деформаций с внешними эксплуатационными нагрузками элементов сварных конструкций. Под руководством В. И. Махненко разработан пакет программ, позволяющих прогнозировать комплекс физических параметров при сварке новых конструкционных материалов, которые определяют качество сварного соединения: размеры и форму зоны проплавления, химический состав и структуру зоны проплавления, термические циклы, микроструктуру и свойства ЗТВ, кинетику напряжений, пластических деформаций и перемещений в процессе сварочного нагрева, риск возникновения горячих и холодных трещин, распределение остаточных напряжений и их влияние на предельную нагрузку при статических или переменных нагружениях. На основе этих теоретических работ совместно с различными отраслевыми НИИ и промышленными предприятиями разработаны оптимальные варианты конструктивных и технологических решений для ряда новых сварных конструкций.

В последние годы В. И. Махненко активно работает над актуальной проблемой оценки ресурса и

продления работоспособности сварных конструкций и сооружений, в том числе объектов энергетики Украины и магистральных трубопроводов.

Итогом плодотворных разработок в этом направлении является монография «Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов совре-



менных конструкций», опубликованная в 2006 г., а также государственная премия Украины по науке и технике за 2008 г.

В. И. Махненко является автором более 360 печатных работ, в том числе 12 монографий. Многие его работы опубликованы в США, Англии и ФРГ.

Владимир Иванович щедро делится своими знаниями с молодежью и постоянно уделяет внимание подготовке научных кадров. С момента образования в 1988 г. кафедры физической металлургии и материаловедения Московского физико-технического института профессор В. И. Махненко читает студентам курс лекций «Прочность сварных конструкций и соединений». Под его руководством подготовлены два доктора и 20 кандидатов технических наук.

Плодотворную научную работу В. И. Махненко успешно совмещает с научно-организационной и общественной деятельностью, являясь руководителем секции Научно-координационного совета по вопросам ресурса и безопасной эксплуатации конструкций, сооружений и машин НАН Украины, членом двух специализированных советов, членом редколлегии журнала «Автоматическая сварка». Под его руководством в последние годы организован и проведен ряд международных конференций по моделированию сварочных процессов.

В. И. Махненко награжден орденом Дружбы народов и медалями. Международное признание заслуг В. И. Махненко в сварочной науке нашло отражение в избрании его членом Американского общества сварщиков (ASM) и членом Международной федерации количественных неразрушающих методов определения (QNDE). За значительный вклад в развитие отечественной науки и техники в направлении создания современных сварных конструкций и обеспечения ресурса их эксплуатации В. И. Махненко в 2004 г. присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки и техники Украины».



В. Н. Липодаеву — 70



Исполнилось 70 лет видному специалисту в области сварки высоколегированных сталей и сплавов, доктору технических наук, ведущему научному сотруднику ИЭС им. Е. О. Патона Владимиру Николаевичу Липодаеву.

После окончания Киевского политехнического института в 1966 г. В. Н. Липодаев был направлен в Институт электросварки им. Е. О. Патона, где прошел путь от инженера до заведующего научным отделом, а затем ведущего научного сотрудника.

Свою трудовую деятельность в институте Владимир Николаевич начал в лаборатории (позже отделе) металлургии и технологии сварки высоколегированных сталей и сплавов, руководимым известным ученым Н. И. Каховским. Им были изучены металлургические особенности сварки особонизкоуглеродистых коррозионностойких сталей, разработаны ряд марок покрытых электродов для их сварки, освоено производство и внедрение электродов на крупных заводах химического машиностроения.

В 1973 г. В. Н. Липодаев защитил кандидатскую диссертацию. В 1977 г. ему присвоено ученое звание «старший научный сотрудник».

В последующие годы работы в ИЭС В. Н. Липодаевым был выполнен ряд оригинальных разработок: предложена технология сварки стабильноаустенитных сплавов с использованием композитного металла шва и разработаны соответствующие сварочные материалы (покрытые электроды и порошковая проволока); разработаны экономнолегированные материалы для сварки без подогрева закалывающихся высокоуглеродистых металлов и раз-

нородных сталей для производства горно-шахтного оборудования; отработаны принципы модифицирования нитридами хромистых ферритных коррозионностойких сталей с целью улучшения их свариваемости; разработана гамма материалов, ряд способов и технологических процессов сварки высоколегированных сталей и сплавов различных типов легирования, позволяющих повысить коррозионную стойкость химической аппаратуры; выявлена либо уточнена природа локальных видов коррозии, в средах высокой агрессивности; обоснованы общие принципы легирования и регулирования примесного состава высоколегированных конструкционных сталей и металла швов, принципы построения электродных покрытий, керамических флюсов и порошковых проволок. Ряд разработок отмечен медалями ВДНХ СССР.

В 1987 г. В. Н. Липодаев защитил докторскую диссертацию. В течение 1988–1992 гг. он руководил научным отделом «Физико-металлургические процессы сварки среднелегированных высокопрочных сталей». С 1982 г. В. Н. Липодаев руководит подготовкой к выпуску журнала «Автоматическая сварка» — ведущего ежемесячного издания ИЭС им. Е. О. Патона. С его непосредственным участием реализован ряд новаций, направленных на сохранение высокого имиджа журнала, его популяризацию и актуализацию с учетом современных требований.

Труд В. Н. Липодаева отмечен Почетной грамотой НАН Украины.

В. Н. Липодаев — автор свыше 160 научных работ, в том числе двух монографий и около 80 авторских свидетельств на изобретения.

Искреннее признание коллег и друзей юбиляр заслужил благодаря своему высокому профессионализму, неиссякаемой деловой и творческой энергии, порядочности и доброжелательности.

Б. Б. Федоровскому — 70



28 сентября 2011 г. исполнилось 70 лет кандидату технических наук, дважды лауреату Государственной премии СССР в области науки и техники Борису Борисовичу Федоровскому.

Б. Б. Федоровский был одним из любимых учеников академика Б. И. Медовара. Он является ярким представителем команды «ЭШПистов» Института электросварки им. Е. О. Па-

тона. Вся жизнь Б. Б. Федоровского связана с нашим институтом, где он проработал почти половину века. ББФ, как любя называл его Учитель и продолжают называть коллеги, — уважаем и в лабораториях НИИ, и в заводских цехах Украины и России, Болгарии и Румынии, США, Индии и Китая. Это уважение основано и на высоком профессионализме нашего коллеги, и на его замечательных человеческих качествах — надежности, смелости, готовности прийти на помощь.

Научно-инженерная деятельность Б. Б. Федоровского связана с электрошлаковыми технологиями. Он внес заметный вклад в создание технологий и оборудования для ЭШП полых слитков, переплава тяжелых куз-



нечных слитков, различных видов литья. Его превосходные организаторские качества блестяще проявились при организации проектирования и изготовления электрошлаковых печей различных типов, внедрении электрошлакового литья на различных заводах страны.

С годами ББФ не утратил интереса к новому. И сегодня с пылом, чаще свойственным людям вдвое, а то и втрое моложе, он продолжает трудиться над разработкой новых электрошлаковых технологий, технических решений, вкладывать свои знания и опыт в развитие электрошлаковых технологий традицион-

ного переплава расходующихся электродов и новых, с прямым использованием жидкого металла.

Гордость последних лет Института электросварки им. Е. О. Патона — технология электрошлаковой наплавки прокатных валков жидким металлом, — создана при активном творческом участии Б. Б. Федоровского и реализована на любимом заводе юбиляра — знаменитом НКМЗ.

Традиционные пожелания добра, благополучия и здоровья коллеги ББФ дополняют пожеланиями успешного решения новых сложнейших задач металлургии и машиностроения XXI века.

Дирекция, коллектив сотрудников ИЭС им. Е. О. Патона, редколлегия журнала «Современная электрометаллургия» сердечно поздравляют наших юбиляров, желают им здоровья, счастья и больших творческих успехов!

Коллектив Института электросварки им. Е. О. Патона
НАН Украины, редколлегия и редакция журнала
«Современная электрометаллургия»
горячо и сердечно поздравляют
заместителя директора по научной работе,
доктора технических наук, академика НАН Украины
Сергея Ивановича Кучука-Яценко
с высокой государственной наградой



УКАЗ

ПРЕЗИДЕНТА УКРАЇНИ № 845/2011

Про відзначення державними нагородами України з нагоди 20-річчя незалежності України

За значний особистий внесок у становлення незалежності України, утвердження її суверенітету та міжнародного авторитету, заслуги у державотворчій, соціально-економічній, науково-технічній, культурно-освітній діяльності, сумлінне та бездоганне служіння

Українському народові

п о с т а н о в л я ю :

нагородити **орденом князя Ярослава Мудрого IV ступеня**

Кучука-Яценка Сергія Івановича — заступника директора Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона, академіка НАН України, м. Київ.

Президент України Віктор ЯНУКОВИЧ



Памяти Леонида Густавовича Пузрина



5 августа 2011 г. на 76-м году ушел из жизни прекрасный человек, скромный и интеллигентный, талантливый инженер, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Леонид Густавович Пузрин.

Родился Л. Г. Пузрин 6 декабря 1935 г. в Киеве. После окончания в 1953 г. средней школы, а затем в 1958 г. Киевского поли-

технического института по специальности «Технология и оборудование сварочного производства» он с 1958 г. и до последних дней жизни трудился в Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР.

Тяга и любовь к точным наукам у Леонида Пузрина проявились еще в школьные годы: не было равных ему в решении сложных задач по математике и физике ни в школе, ни в политехническом институте.

С первых дней работы в Институте электросварки Л. Г. Пузрин зарекомендовал себя вдумчивым и изобретательным экспериментатором. Поражало его равнодушие ко всему, что он делал, стремление глубоко вникать в суть проблем, которые ему приходилось решать ежедневно. Им предложены десятки оригинальных изобретений в области сварки, пайки и специальной электрометаллургии.

В 1967 г. Л. Г. Пузрин блестяще защитил кандидатскую диссертацию. Проведенные им материаловедческие исследования в области соединения жаропрочных хромоникелевых сталей и сплавов способами дуговой, электронно-лучевой и диффузионной сварки позволили создать уникальные технологии и оборудование для решения задач, связанных с повышением ресурса двигателей авиационных и космических летательных аппаратов.

Леонид Густавович был творческой личностью, его научные интересы отличались большим разнообразием. Он является одним из разработчиков и исследователей технологий сварки без расплавления основного металла: автовакуумной сварки давлением (АСД), прессовой сварки-пайки, получив-

ших применение в производстве биметалла, прецизионных тонкостенных биметаллических труб для энергетического машиностроения.

Обнаруженное и изученное с его участием явление самопроизвольной очистки поверхности металла при нагреве в условиях ограниченного доступа воздуха послужило основой для АСД. Он предложил и довел до промышленного применения способ автовакуумной высокотемпературной некапиллярной пайки изделий, в том числе биметаллических, практически неограниченных размеров (толстостенные биметаллические контейнеры массой до 100 т для перевозки отработанного ядерного топлива, сосуды высокого давления, толстолистовой биметаллический лист и др.). Им создан ряд новых процессов электрошлакового переплава и наплавки (неподвижный расходный электрод), нашедших применение в промышленности при изготовлении термобиметалла, индукционное шлаковое и порционное электрошлаковое литье для получения крупнотоннажных слитков.

В 1972–1996 гг. Л. Г. Пузрин руководил лабораторией высокотемпературной пайки, разработки которой в виде технологий и специального оборудования внедрены на ряде предприятий бывшего СССР.

Как высокоавторитетный специалист в области пайки Леонид Густавович многие годы возглавлял секцию «Пайка материалов» научного совета ГКНТ СССР по проблеме «Новые процессы сварки и сварные конструкции». Л. Г. Пузрин автор более 150 научных работ, авторских свидетельств и зарубежных патентов на изобретения.

Свой богатый научный и жизненный опыт с присущим ему уважением к людям Л. Г. Пузрин неустанно и щедро передавал своим молодым сотрудникам, помогал им советом и делом в подготовке и защите кандидатских диссертаций.

У Леонида Густавовича было много друзей, которых он любил и которые любили и уважали его за ум и порядочность, доброжелательность и надежность, за умение в трудную минуту ненавязчиво и бескорыстно предложить свою помощь.

Светлая память о Леониде Густавовиче навсегда сохранится в сердцах тех, кто его знал, имел счастье трудиться рядом с ним, общаться.



Памяти Евгения Христофоровича Шахпазова

6 августа 2011 г. на 62-м году жизни скончался генеральный директор ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина», доктор технических наук, профессор Евгений Христофорович Шахпазов.

Евгений Христофорович Шахпазов родился 19 марта 1950 г. После окончания в 1972 г. Московского института стали и сплавов Е. Х. Шахпазов был направлен в ЦНИИчермет им. И. П. Бардина, где до 1987 г. работал в лаборатории конвертерного производства стали.

Под руководством Е. Х. Шахпазова проводились работы на Новолипецком и Карагандинском металлургических комбинатах по развитию кислородно-конвертерного производства стали, предназначенной для получения важнейших видов металлопродукции — холоднокатаного автомобильного листа и жести. Решались проблемы оптимизации технологии по всему циклу: выплавка—непрерывная разливка—получение готовой металлопродукции. Разработаны научные основы технологических режимов производства конвертерной стали листового сортамента, ориентированные на ресурсосбережение, низкое содержание примесей и высокое качество продукции, теоретические основы использования в сталеплавильном производстве новых шихтовых композиционных материалов.

С 1987 по 2003 гг. Е. Х. Шахпазов работал на ответственных должностях в органах исполнительной власти (ГКНТ СССР, Миннауки России, ГКНТ России, Минпромнауки России). Возглавляя самостоятельные управления, отделы, являясь заместителем руководителя департамента, курировал ряд отраслей промышленности: металлургию, машиностроение, строительство, перспективные материалы. Е. Х. Шахпазов организовал активную поддержку науки. Под его руководством и при непосредственном участии были разработаны соответствующие разделы Федеральных целевых научно-технических программ развития науки и техники, присвоен статус государственных научных центров ЦНИИчермет им. И. П. Бардина, ВНИИМЕТМАШ, ЦНИИТМАШ, Гинцветмет. Организованная поддержка дала возможность сохранить в кризисное время стратегический научный потенциал, создать ряд новых прогрессивных технологий.

С 2003 по 2005 г. Е. Х. Шахпазов работал заместителем директора по научным вопросам и заведующим лабораторией физико-химии металлургических расплавов имени академика А. М. Самарина Института металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН. Под руководством Е. Х. Шахпазова были выполнены работы по восстановлению экспериментально-производственной базы института, поисковые исследовательские работы по созданию нового типа конструкционного материала, разработан процесс по внедоменному восстановлению железосодержащих материалов.

С 2005 г. Е. Х. Шахпазов — генеральный директор ЦНИИчермет им. И. П. Бардина. Разработанная им стратегия развития этого крупнейшего

научного центра охватывает такие магистральные научные направления, как обеспечение металлом нефтяной и газовой промышленности, автомобильной промышленности, железно-

дорожного транспорта, оборонных отраслей и высокотехнологичных производств, в том числе аморфных и нанокристаллических материалов.

Е. Х. Шахпазов возглавляет комплексные бригады ЦНИИчермет им. И. П. Бардина по проблеме разработки и внедрения важнейших видов металлопродукции, в том числе трубного сортамента. Под его руководством разработана и выполняется «Межведомственная программа работ по освоению новых видов и улучшению качества металлопродукции для ОАО «АВТОВАЗ» на период 2005–2010 гг.», а также разработаны передовые технологии производства нового поколения автолистовых материалов с уникальным сочетанием показателей прочности и пластичности.

Под руководством Е. Х. Шахпазова выполнен ряд фундаментальных исследований, позволивших на уровне молекулярных представлений создать новую концепцию строения шлаковых и металлических расплавов. Это впервые дало возможность создать методы точного прогнозирования типа и количества неметаллических включений в слитках; в сложных процессах современной ковшевой металлургии и непрерывного литья заготовок.

Разработаны теоретические принципы создания принципиально новых материалов, устойчивых против разрушения в активных углеродсодержащих газовых средах.

Под руководством Е. Х. Шахпазова значительно расширилась и обновилась экспериментальная база ЦНИИчермет. В январе 2010 г. был пущен экспериментальный уникальный плавно-прокатный комплекс со станом горячей прокатки с ускоренным охлаждением.

В 2007 г. в ЦНИИчермет основан и регулярно издается научно-технический журнал «Проблемы черной металлургии и материаловедения», главным редактором которого являлся Е. Х. Шахпазов.

Е. Х. Шахпазов — известный ученый и организатор науки в области черной металлургии, теории и технологии металлургических процессов, конструкционных материалов на основе железа, автор более 230 научных трудов, в том числе трех монографий, свыше 30 патентов.

Е. Х. Шахпазов — лауреат премии Совета Министров СССР 1987 г. за решение проблемы производства особо тонкой жести, в том числе с покрытием; Премии Правительства РФ 1999 г. за разработку технологии пассивации металлизированных





окамышей на Оскольском электрометаллургическом комбинате; Премии Правительства РФ 2001 г. за создание уникального композиционного материала на основе первородной шихты; Премии Правительства РФ 2008 г. за создание и освоение комплекса нового инъекционного оборудования.

Е. Х. Шахпазов — член Правительственной комиссии по вопросам развития металлургического комплекса, член Координационного совета по промышленной политике в металлургическом комплексе при Минпромторг России, председатель ученого и дис-

сертационного советов ЦНИИчермет им. И. П. Бардина, член экспертного совета ВАК, член редколлегий журналов «Сталь», «Металлург», «Электрометаллургия», «Современная электрометаллургия» и др.

Своей энергией и трудолюбием он заслужил большой авторитет и уважение специалистов металлургической отрасли.

Светлая память о Евгении Христофоровиче Шахпазове, человеке яркой судьбы и многогранной творческой личности, надолго сохранится в сердцах тех, кто его знал и с ним работал.

К 100-летию со дня рождения М. К. Янгеля (1911-1971 гг.)



Выдающемуся ученому, Главному конструктору, руководителю и организатору работ по созданию ракетно-космической техники, доктору технических наук, действительному члену АН УССР и АН СССР, дважды Герою Социалистического Труда Михаилу Кузьмичу Янгелю 25 октября исполнилось 100 лет со дня рождения. Окончил МАИ им. Орджоникидзе по специальности «Самолетостроение» (1937) и Академию авиационной промышленности СССР (1950).

Свой творческий путь Михаил Кузьмич начал в авиационной промышленности, работая конструктором, ведущим инженером. Затем выдвигался на руководящие должности, где в полной мере раскрыл свой самобытный, яркий талант. Работал помощником Главного конструктора, заместителем директора в КБ Н. Н. Поликарпова на заводе им. Менжинского (1935-1944), заместителем главного инженера в ОКБ-155 А. И. Микояна (1944), ведущим инженером в ОКБ В. М. Мясищева (1945).

С 1950 по 1954 гг. трудился в НИИ-88 (ныне ЦНИИмаш) директором и главным инженером. Участвовал в разработке проектов ракет Р-5, Р-7, руководил разработкой проектов прототипов ракет Р-11, Р-12, занимался исследованиями в области аэродинамики, баллистики, материаловедения и других проблем ракетной отрасли. С 1954 по 1971 гг. — Главный конструктор ОКБ-586 (КБ «Южное») в Днепропетровске. Именно здесь, возглавив молодой коллектив вновь созданного предприятия, М. К. Янгель стал основоположником нового направления в ракетостроении, заключающегося в создании боевых ракет на высококипящих компонентах топлива с автономной системой управления и применении высокочащенных шахтных пусковых установок. Его первая ракета Р-12 послужила основой создания Ракетных войск стратегического назначения СССР и находилась на боевом дежурстве более 30 лет. Всего было произведено 2300

ракет этого типа. За короткий период времени под его руководством были созданы ракетные комплексы Р-14, Р-16, Р-36, МР УР-100, Р-36М, каждый из которых отличался постоянно возрастающим техническим совершенством и наращиванием боевой мощи. Параллельно на основе боевых ракет разрабатывались ракеты-носители «Космос», «Космос-2», «Циклон-2», «Циклон-3», ракетный блок лунного корабля комплекса Н1-ЛЗ, а также космические аппараты серии «Космос», «Интеркосмос», «Метеор», «Целина».

По заказам М. К. Янгеля в ИЭС им. Е. О. Патона выполнены десятки поисковых научно-исследовательских работ по сварке и пайке различных узлов из новых специальных сталей, высокопрочных алюминиевых и титановых сплавов, циркония и других металлов и сплавов; контролю качества, ремонту дефектов; разработке специализированного оборудования для изготовления крупногабаритных пространственных конструкций, в том числе тонкостенных панелей из легких высокопрочных алюминиевых сплавов, трубчатых и оболочковых изделий из тугоплавких и химически активных металлов.

За выдающиеся заслуги в создании ракетной техники М. К. Янгель стал лауреатом Ленинской (1960), Государственной (1967) премий и Премии им. С. П. Королева (1970). Труд М. К. Янгеля отмечен орденами Ленина (1956, 1959, 1961, 1969), Октябрьской Революции (1971) и другими высокими правительственными наградами.

Сердце выдающегося ученого остановилось 25 октября 1971 г., в день его шестидесятилетнего юбилея.

Федерации космонавтики СССР и Украины учредили медаль его имени. Стипендию М. К. Янгеля получают лучшие студенты МАИ и ДНУ. Его имя присвоено Государственному конструкторскому бюро «Южное» (1991). Именем М. К. Янгеля названы астероид и кратер на Луне, поселок в Иркутской области, пик на Памире, океанский сухогруз, улицы в Москве, Киеве, Днепропетровске, Байконуре.

Память о Михаиле Кузьмиче Янгеле навсегда останется в истории.



УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В 2011 г.

Автор и название статьи	№ журнала	Автор и название статьи	№ журнала
Уникальная технология ликвидации подводных аварий нефте-, газопроводов, разработанная украинскими учеными	1	Курапов Ю. А., Мовчан Б. А., Литвин С. Е., Дидикин Г. Г., Романенко С. М. Влияние концентрации железа на адсорбционную способность наночастиц оксидов железа в пористой матрице NaCl к кислороду воздуха	1
ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ		Мушегян В. О. Математическое моделирование электронно-лучевой плавки молибдена	3
Балицкий А. И., Медовар Л. Б. Некоторые проблемы производства материалов для современного энергомашиностроения	1	Мушегян В. О. Оптимизация технологии электронно-лучевой плавки молибдена методом математического моделирования	4
Биктагиров Ф. К., Шаповалов В. А., Ефимов М. В., Селютин А. А., Падалка В. Г. Повышение качества крупных слитков	1	Мушегян В. О. Электронно-лучевой переплав отходов чеканочного инструмента	2
Зайцев В. А., Медовар Л. Б., Тищенко П. И., Федоровский Б. Б., Журавель В. М. Применение ЭШП по двухконтурной схеме для получения сталемедных заготовок анодов дуговых печей постоянного тока	2	Тригуб Н. П., Аснис Е. А., Березос В. А., Северин А. Ю., Пискун Н. В., Статкевич И. И. Получение сплавов интерметаллида системы TiAl с добавками бора и лантана способом ЭЛПЕ	3
Мужиченко А. Ф., Полещук М. А., Шевцов В. Л. Исследование особенностей тепловыделения в шлаковой ванне при электрошлаковом литье с приплавлением	2	Тригуб Н. П., Березос В. А., Корнийчук В. Д., Мосунов Ю. А. Получение высококачественных слитков-слябов никеля способом электронно-лучевой плавки	2
Протококилов И. В. О возможности измельчения кристаллической структуры полых титановых слитков при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке	4	Яковчук К. Ю., Рудой Ю. Э., Нероденко Л. М., Оноприенко Е. В., Ахтырский А. О. Влияние кривизны поверхности подложки на структуру и свойства термобарьерных, конденсационных покрытий	1
Скрипник С. В. Получение крупногабаритных тонкостенных отливок сложной формы с применением электрошлаковой тигельной плавки и литья по газифицируемым моделям	3	ПЛАЗМЕННО-ДУГОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ	
Скрипник С. В., Чернега Д. Ф. Критерии выбора конструкции литейных форм для центробежного электрошлакового литья	2	Жиров Д. М. Применение плазменно-дугового жидкофазного восстановления металлов газами для переработки комплексного сырья	3
Федоровский Б. Б., Медовар Л. Б., Стовпченко А. П., Журавель В. М., Саенко В. Я., Зайцев В. А., Смолярко В. Б., Лебедь В. А. О новом способе ЭШП крупногабаритных полых слитков	3	Шаповалов В. А., Биктагиров Ф. К., Бурнашев В. Р., Никитенко Ю. А. Плазменно-дуговой переплав заготовки, скомпактированной из стружки стали ЭП609-Ш	3
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ		Шаповалов В. А., Якуша В. В., Гниздыло А. Н., Смалюх А. Р., Ботвинко Д. В. Влияние перемещения плазменного источника нагрева на формирование структуры плоских монокристаллов вольфрама	2
Ахонин С. В., Кругленко М. П., Костенко В. И. Математическое моделирование процесса растворения кислородсодержащих тугоплавких включений в расплаве титана	1	ВАКУУМНО-ИНДУКЦИОННАЯ ПЛАВКА	
Аснис Е. А., Лесной А. Б., Пискун Н. В. Рафинирование монокристаллов кремния при выращивании их способом электронно-лучевой бестигельной зонной плавки	3	Коледа В. Н., Илошенко В. М., Биктагиров Ф. К., Гнатушенко А. В., Лукьяненко Е. П. Рафинирование металла при плавке меди и ее сплавов из отходов	1
Анис Е. А., Пискун Н. В., Статкевич И. И. Очистка кремния от фоновых и легирующих примесей при электронно-лучевой бестигельной зонной плавке	4	Шейко И. В., Шаповалов В. А., Якуша В. В., Микитенко Ю. А., Жиров Д. М. Охлаждаемые кристаллизаторы для формирования слитков с электромагнитным воздействием на расплав	4
Березос В. А., Тригуб Н. П. Получение сплавов с эффектом памяти формы на основе титана способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью	4	ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТАЛЛУРГИИ	
Курапов Ю. А., Литвин С. Е., Дидикин Г. Г., Романенко С. М. Структура двухфазных конденсатов Cu-NaCl, осаждаемых из паровой фазы в вакууме	2	Ахонин С. В., Кругленко М. П., Петриченко И. К., Вржижевский Э. Л., Мищенко Р. Н., Селин Р. В. Влияние термического цикла сварки на структурные превращения в сплавах системы Ti-Si-X	4
		Григоренко Г. М., Лакомский В. В., Статкевич И. И., Козин Р. В., Аснис Е. А., Пискун Н. В., Березос В. А. Зонная перекристаллизация литого интерметаллидного сплава на основе TiAl, легированного ниобием и хромом	2



Автор и название статьи	№ журнал
Костин В. А., Статкевич И. И., Аснис Е. А., Григоренко Г. М., Лакомский В. В., Пискун Н. В., Козин Р. В., Березос В. А. Фрактографические исследования сплава Ti-Al-(ЛЭ) после зонной перекристаллизации	3
Лакомский В. В., Помарин Ю. М., Григоренко Г. М., Козин Р. В. Механизм азотирования жидкого металла, покрытого шлаком, азотом из газовой фазы	3
Малашенко И. С., Ровков В. А., Куренкова В. В., Белявин А. Ф., Федотов Д. А., Сычев В. К. Увеличение циклической долговечности монокристаллических лопаток из сплава ЖС36ВИ путем дробеструйной обработки их хвостовиков микрошариками	3
Пискун Н. В., Богайчук И. Л., Аснис Е. А., Григоренко Г. М., Статкевич И. И., Лакомский В. В., Костин В. А., Козин Р. В., Березос В. А. Особенности структуры интерметаллидного сплава после зонной перекристаллизации	4
Протокилов И. В. МГД технологии в металлургии (Обзор)	4
Чубов Л. Н., Григоренко Г. М., Лакомский В. В. Контроль методом ЭСА-ИСП химического состава флюсов для специальной электрометаллургии и сварки	1
ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ СТАЛИ И ФЕРРОСПЛАВОВ	
Григоренко Г. М., Грыцкив Я. П., Чубов Л. Н., Грыцкив А. Я. Анализ железорудного концентрата методом ЭСА-ИСП	3
Кирик С. Н., Маковецкая О. К. Ситуация и основные тенденции на рынке стали и стальной продукции (2009-2010 гг.)	2
Синяков Р. В. Разработка технологии выплавки и внепечной обработки стали с использованием программного комплекса «DesigningMelt»3	2
ЭНЕРГОРЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ	
Лакомский В. И., Пальти А. М., Юрченко Д. Д. Компьютерное моделирование тепловых и электрических процессов в электрокальцинаторе	2
Шаповалов В. А., Биктагиров Ф. К., Бунашев В. Р., Колесниченко В. И., Степаненко В. В., Рейда Н. В., Карускевич О. В., Ботвинко Д. В. Электротермическое компактирование металлических материалов	4
Шаповалов В. А., Бунашев В. Р., Биктагиров Ф. К., Игнатов А. П., Мьяльница Г. Ф., Степаненко В. В., Брагин М. А., Пудиков В. Н., Подъячев Д. В., Ботвинко Д. В., Жиров Д. М., Гнатушенко А. В. ЭШП электродов, спрессованных из стружки аустенитных нержавеющей сталей	4
НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ	
Аршук М. В., Микитчик А. В., Хижняк В. Г., Карпец М. В. Титаноалюминидные покрытия на стали 12X18H10T с барьерным слоем нитрида титана	2
Григоренко Г. М., Пузрин Л. Г., Полещук М. А., Пузрин А. Л. Биметаллические материалы и изделия, изготавливаемые способом высокотемпературной некапиллярной пайки	3

Автор и название статьи	№ журнал
Ковинский И. С., Крушинская Л. А., Мовчан Б. А. Структура и некоторые свойства конденсатов хлорида натрия, полученных электронно-лучевым испарением с последующим осаждением в вакууме	1
Максюта И. И., Квасницкая Ю. Г., Лашнева В. В. Технологические процессы получения высокоразвитых медицинских сплавов на кобальто-хромовой основе	3
Никитенко Ю. А. Получение профилированных слитков кремния для солнечной энергетики	1
Смирнов И. В. Некоторые особенности ионно-плазменной металлзации керамических порошков	2
РЕЦЕНЗИИ И НАУЧНЫЕ ДИСКУССИИ	
Гасик М. И., Поляков О. И. Рецензия на научную монографию В. П. Малышева, А. М. Турдукожаевой, Е. А. Оспанова, Б. Саркенова «Испаряемость и кипение простых веществ»	2
Рецензия на монографию М. И. Гасика, М. М. Гасика «Электротермия кремния (физикохимия и технология)»	3
ИНФОРМАЦИЯ	
Ахонин С. В. Информация о 12-й Всемирной конференции «Ti-2011»	3
Ахонин С. В. Международная конференция «Ti-2011 в СНГ»	2
Бакумцев Н. И. III Патоновские чтения-2010	1
Б. Б. Федоровскому — 70	4
В. И. Махненко — 80	4
В. Н. Липодаеву — 70	4
Григоренко С. Г. VI Всеукраинская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии»	3
Диссертация на соискание ученой степени	2
Дмитрик В. В. 3-я Международная конференция «High Mat Tech»	4
Єфанов В. С. На шляху до інноваційних лікарських препаратів	4
Календарь конференций и выставок на 2011 г. (2-е полугодие)	2
К. А. Ющенко — 75	1
К 85-летию со дня рождения В. И. Лакомского	4
Непорожный Ю. В., Собко-Нестерук О. Е., Чайка Н. В., Васюра В. Н., Третяк Н. Г., Горчинский И. Е., Дубовая Т. И. Новые конструкции вакуумных камер печей для электронно-лучевой плавки	1
Новые книги	1
Памяти Евгения Христофоровича Шахпазова	4
Памяти Леонида Густавовича Пузрина	4
Российская титановая миссия	2
Рябцев А. Д., Троянский А. А. Рафинирование и легирование титана в процессе камерного электрошлакового переплава	1
Рябцев И. А. Сессия научного совета по новым материалам при комитете по естественным наукам международной ассоциации академий наук	3
Чубов Л. Н., Григоренко Г. М., Лакомский В. В. Сравнительная оценка точности методов РФА и ЭСА-ИСП при анализе состава флюсов	2
Указатель статей, опубликованных в 2011 г.	4



УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

Аршук М. В., №2

Аснис Е. А. №2,3(3),4(2)

Ахонин С. В., №1,2,3,4

Ахтырский А. О., №1

Балицкий А. И., №1

Бакумцев Н. И., №1

Белявин А. Ф., №3

Березос В. А., №2(2),
3(2),4(2)Биктагиров Ф. К., №1(2),
3,4(2)

Богайчук И. Л., №4

Ботвинко Д. В., № 2,4(2)

Бурнашев В. Р., №3,4(2)

Васюра В. Н., №1

Вржижевский Э. Л., №4

Гасик М. И., №2

Гнатушенко А. В., №1,4

Гниздыло А. Н., №2

Григоренко Г. М., №1,2(2),
3(4),4

Григоренко С. Г., №3

Грыцкив А. Я. №3

Грыцкив Я. П. №3

Горчинский И. Е., №1

Дидикин Г. Г., №1,2

Дмитрик В. В., №4

Дубовая Т. И., №1

Ефанов В. С., №4

Ефимов М. В., №1

Жиров Д. М., №3,4(2)

Журавель В. М., №2,3

Зайцев В. А., №2,3**М**ищенко Р. Н., №4

Мовчан Б. А., №1(2)

Мосунов Ю. А., №2

Мужиченко А. Ф., № 2

Мушегян В. О., №2,3,4

Мяльница Г. Ф., №4

Непорожный Ю. В., №1

Нероденко Л. М., №1

Никитенко Ю. А., №1,3

Оноприенко Е. В., №1**П**адалка В. Г., №1

Пальти А. М., №2

Петриченко И. К., № 4

Пискун Н. В., №2,3(3),
4(2)

Подьячев Д. В., №4

Полещук М. А., №2,3

Поляков О. И., №2

Помарин Ю. М., №3

Протокилов И. В., №4(2)

Пудиков В. Н., №4

Пузрин А. Л., №3

Пузрин Л. Г., №3

Ровков В. А., №3

Романенко С. М., №1,2

Рудой Ю. Э., №1

Рябцев А. Д., №1

Рябцев И. А., №3

Саенко В. Я., №3

Северин А. Ю., №3

Селин Р. В., №4

Селютин А. А., №1

Синяков Р. В., №2

Скрипник С. В., №2,3

Смалюх А. Р., №2

Смирнов И. В., №2

Смолярко В. Б., №3

Собко-Нестерук О. Е., №1

Статкевич И. И., №2,3(2),
4(2)

Степаненко В. В., №4

Стовпченко А. П., №3

Сычев В. К., №3

Тищенко П. И., №2

Третьак Н. Г., №1

Тригуб Н. П., №2,3,4

Троянский А. А., №1

Туренков Н. М., №3

Федоровский Б. Б.,
№2,3

Федотов Д. А., № 3

Хижняк В. Г., №2**Ч**айка Н. В., №1

Чернега Д. Ф., №2

Чубов Л. Н., №1,2,3

Шаповалов В. А., №1,
2,3,4(3)

Шевцов В. Л., №2

Шейко И. В., №4

Юрченко Д. Д., №2**Я**ковчук К. Ю., №1

Якуша В. В., №2,4

НКМЗ завоевал дипломы на одной из крупнейших выставок Европы

Посетители выставки больше всего интересовались уникальными технологическими возможностями НКМЗ

Четыре диплома 17-й международной специализированной выставки «Металл-Экспо-2011», состоявшейся в Москве, завоевал НКМЗ.

По данным пресс-службы завода, участниками выставки, входящей в пятерку крупнейших выставок Европы, стали 640 компаний из 32 стран мира. В их число входят ведущие предприятия черной и цветной металлургии, производители и поставщики металлургического оборудования.

Знакомясь с предложениями новокраматорцев, посетители московской выставки проявили наибольший интерес к уникальным технологическим возможностям НКМЗ по изготовлению крупных поковок, валов, корпусов, крупногабаритного литья.

В итоге НКМЗ был награжден дипломами «За комплексную реконструкцию транспортного оборудования кислородно-конвертерного цеха №2» и «За разработку и изготовление стационарного миксера МС-1300 для хранения жидкого чугуна» для ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат».

Также краматорчане завоевали еще два диплома: «За разработку и внедрение на российском рынке инновационного и высококачественного металлургического, прокатного и кузнечно-прессового оборудования» и «За профессиональную презентацию продукции и услуг».



<http://www.vp.donetsk.ua/>
(28.11.2011)

**ПОДПИСКА – 2012 на журнал «Современная электрометаллургия»**

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
160 грн	320 грн	900 руб.	1800 руб.	26 дол. США	52 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Подписку на журнал «Современная электрометаллургия» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств «Пресса», «Идея», «Саммит», «Пресс-центр», KSS, «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).

**РЕКЛАМА в журнале «Современная электрометаллургия»**

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- Первая страница обложки (190×190 мм)
- Вторая, третья и четвертая страницы обложки (200×290 мм)
- Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200×290 мм)
- Вклейка А4 (200×290 мм)
- Разворот А3 (400×290 мм)
- 0,5 А4 (185×130 мм)
- 0,25 А4 (90×130 мм)

Контакты:

тел./факс: (38044) 200-82-77;
200-54-84; 205-22-07
E-mail: journal@paton.kiev.ua

Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрезки 200×290 мм
- В рекламных макетах для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5 мм с целью избежания потери части информации

Все файлы в формате ИРС РС

- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0
- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

Стоимость рекламы и оплата

- Цена договорная

- По вопросам стоимости размещения рекламы, свободной площади и сроков публикации просьба обращаться в редакцию
- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу
- Для постоянных партнеров предусмотрена система скидок
- Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади
- Публикуется только профильная реклама
- Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

Подписано к печати 25.11.2011. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 8,8. Усл. кр.-отт. 7,8. Уч.-изд. л. 9,6.

Печать ООО «Фирма «Эссе». 03142, г. Киев, пр. Акад. Вернадского, 34/1.