

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

**Издатель:** Международная ассоциация «Сварка»

Выходит 4 раза в год

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

Главный редактор  
**Б. Е. Патон**

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

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

Г. М. Григоренко (Украина)  
**В. И. Кашин (Россия)**  
Б. Короушич (Словения)  
С. Ф. Медина (Испания)  
А. Митчелл (Канада)  
Б. Е. Патон (Украина)  
В. Рамакришна Рао (Индия)  
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) 528 34 84,  
529 26 23  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj

**Редактор:**

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

Свидетельство  
о государственной регистрации  
КВ 6185 от 31.05.2002

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

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

**СОДЕРЖАНИЕ**

<b>Патон Б. Е.</b> Современные достижения ИЭС им. Е. О. Патона в области сварки и родственных процессов.....	3
<b>ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ</b>	
<b>Медовар Л. Б., Саенко В. Я., Ремизов А. Г., Ярош В. М.</b> Особенности структуры биметаллического арматурного профиля с коррозионно-стойким лакирующим слоем из стали 316L .....	19
<b>Еремин Е. Н., Жеребцов С. Н.</b> Электрошлаковое кокильное литье сплошных роговых сердечников.....	23
<b>ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ</b>	
<b>Жук Г. В., Березос В. А., Тригуб Н. П.</b> Прогнозирование структуры титановых слитков-слябов, получаемых способом ЭЛПЕ .....	28
<b>Ахонин С. В., Миленин А. С., Пикулин А. Н.</b> Моделирование процессов испарения легирующих элементов при электронно-лучевом оплавлении поверхности слитков-слябов из сплавов на основе титана .....	32
<b>Махоткин А. В., Малашенко И. С., Топал В. И.</b> Процессы разделения при электронно-лучевом испарении сплавов и смесей веществ .....	36
<b>Варич И. Ю., Ахонин С. В., Тригуб Н. П.</b> Утилизация лома тантала способом электронно-лучевой плавки .....	44
<b>ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ПЕРЕПЛАВ</b>	
<b>Жадкевич М. Л., Тэлин В. В., Теслевич С. М., Лесной А. Б., Демченко В. Ф., Шаповалов В. А.</b> Оптимизация тепловой работы тигля при вакуумно-дуговой гарнисажной плавке .....	47
<b>ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТАЛЛУРГИИ</b>	
<b>Крицкий В. Е., Бурылев Б. П., Крицкая Е. Б.</b> Электропроводность расплавов смесей фторидов и хлоридов .....	51
<b>ЭНЕРГОРЕСУРСΟΣБЕРЕЖЕНИЕ</b>	
<b>Патон Б. Е., Чернец А. В., Маринский Г. С., Коржик В. Н., Петров В. С.</b> Перспективы применения плазменных технологий для уничтожения и переработки медицинских и других опасных отходов.....	54
<b>Жадкевич М. Л., Шаповалов В. А., Константинов В. С., Степаненко В. В., Торхов Г. Ф., Бурнашев В. Р., Рейда Н. В., Колесниченко В. И.</b> Получение расходуемых электродов компактированием титановой губки под током .....	64
<b>ИНФОРМАЦИЯ</b>	
<b>Смоляренко В. Д.</b> Семинар «Мини-заводы нового поколения: развитие на основе инноваций» .....	68
III Всеукраинская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии» .....	70
Диссертация на соискание ученой степени .....	71

**ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ**



ОАО «Украинский графит»

Научно-производственный центр «ТИТАН»



Международный центр электронно-лучевых технологий

КП «Запорожский титано-магниевого комбинат»

**SOVREMENNAYA  
ELEKTROMETALLURGIYA**  
(Electrometallurgy Today)

**№ 3 (80)**  
**2005**

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. Lakomskii,  
V. K. Lebedev, L. B. Medovar,  
B. A. Movchan, A. N. Petrunko,  
N. P. Trigub, A. A. Troyanski

**THE INTERNATIONAL  
EDITORIAL COUNCIL:**

G. M. Grigorenko (Ukraine)  
V. I. Kashin (Russia)  
B. Koroushich (Slovenia)  
S. F. Medina (Spain)  
A. Mitchell (Canada)  
B. E. Paton (Ukraine)  
V. Ramakrishna Rao (India)  
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) 528 34 84,  
529 26 23  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj

**Editor:**

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

State Registration Certificate  
KV 6185 of 31.05.2002

All rights reserved.  
This publication and each of the articles  
contained here in are protected  
by copyright.  
Permission to reproduce material  
contained in this journal must be obtained  
in writing from the Publisher.

**CONTENTS**

**Paton B. E.** Current achievements of the E. O. Paton Electric  
Welding Institute in the field of welding and related processes .....3

**ELECTROSLAG TECHNOLOGY**

**Medovar L. B., Saenko V. Ya., Remizov A. G., Yarosh V. M.**  
Specifics of structure of bimetal reinforcement profile with a  
corrosion-resistant layer of steel 316 L .....19

**Eryomin E. N., Zhrebtsov S. N.** Electroslag chill casting of solid  
horn-shaped cores .....23

**ELECTRON BEAM PROCESSES**

**Zhuk G. V., Berezos V. A., Trigub N. P.** Prediction of structure  
of titanium ingots-slabs produced by EBCHM .....28

**Akhonin S. V., Milenin A. S., Pikulin A. N.** Modeling of process  
of evaporation of alloying elements in electron-beam surface  
melting of ingots-slabs produced from titanium-base alloys .....32

**Makhotkin A. V., Malashenko I. S., Topal V. I.** Processes  
of separation of alloys and mixtures of materials in electron beam  
evaporation .....36

**Varich I. Yu., Akhonin S. V., Trigub N. P.** Utilization of tantalum  
scrap using the method of electron beam melting .....44

**VACUUM-ARC REMELTING**

**Zhadkevich M. L., Telin V. V., Teslevich S. M., Lesnoy A. B.,  
Demchenko V. F., Shapoval V. A.** Optimization of crucible  
thermal conditions in vacuum-arc skull melting .....47

**GENERAL PROBLEMS OF METALLURGY**

**Kritsky V. E., Burylyov B. P., Kritskaya E. B.** Electric  
conductivity of melts of fluorides and chlorides mixtures .....51

**ENERGY-AND RESOURCES SAVING**

**Paton B. E., Chernets A. V., Marinsky G. S., Korzhik V. N.,  
Petrov V. S.** Prospects of application of plasma technologies for  
disposal and recycling of medical and other dangerous waste .....54

**Zhadkevich M. L., Shapovalov V. A., Konstantinov V. S.,  
Stepanenko V. V., Torkhov G. F., Burnashev V. R.,  
Reida N. V., Kolesnichenko V. I.** Producing of consumable  
electrodes by compacting titanium sponge at passing current .....64

**INFORMATION**

**Smolyarenko V. D.** Seminar «Mini-plants of new generation:  
progress on the basis of innovations» .....68

III All-Ukrainian Scientific-Technical Conference of young scientists  
and specialists «Welding and related technologies» .....70

Thesis for scientific degree .....71

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

УДК 621.791.001.12/.8

# СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА В ОБЛАСТИ СВАРКИ И РОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Академик Б. Е. Патон

Представлены разработки ИЭС им. Е. О. Патона в области сварки и родственных процессов, выполненные в последние годы. Приведены данные о новых технологических процессах, путях совершенствования технологий и материалов, повышении ресурса эксплуатации сварных конструкций.

Developments of the E.O.Paton Electro Welding Institute in the field of welding and related processes, made over the recent years, have been presented. They include information about the new technological processes, way of updating the technologies and materials and increase in service life of welded structures.

*Ключевые слова:* парофазные технологии; электронно-лучевая сварка и переплав; выращивание монокристаллов; контактная стыковая сварка; дуговые и гибридные процессы; электрошлаковые технологии, сварка живых тканей; математическое моделирование; сварка взрывом; сварочные материалы; защитные покрытия; неразрушающий контроль; техническая диагностика; сварные конструкции; ресурс эксплуатации

В сентябре 2004 г. Институт электросварки отметил 70-летний юбилей. Традиции, заложенные основателем института Е. О. Патоном, базируются на сочетании целенаправленных фундаментальных теоретических исследований с инженерно-прикладными разработками, тесными творческими связями с промышленными предприятиями, что отличает их от таковых многих других научно-исследовательских организаций. Институт является крупнейшим научно-исследовательским центром в области сварки и родственных технологий. В настоящее время совершенствуются его структура и система управления с целью дальнейшего развития сварки и родственных процессов, а также решения базовых проблем промышленного производства в новых условиях.

В предыдущие годы многократно освещались различные направления деятельности института и его достижения в научно-техническом прогрессе общества. В данной статье представлены некоторые последние научные и прикладные разработки института.

## Новые технологические процессы

*Парофазные технологии.* Активно развивается новое направление получения неорганических материалов с аморфной, нано- и микроразмерной структурой способами высокоскоростного электронно-лучевого испарения веществ и осаждения паровой фазы в вакууме (ЕВ-РВД). Новые металлические, металлокерамические и керамические материалы по этой технологии производят в виде функциональных или конструкционных покрытий на поверхности различных изделий, а также фольг, пластин (листа) или некоторых конструктивных элементов с широким диапазоном толщин (от 1...2 мкм до 5...10 мм).

Особого внимания заслуживает технология электронно-лучевого испарения композиционных слитков, в которых «запрограммированы» состав и структура градиентных материалов, осаждаемых из паро-

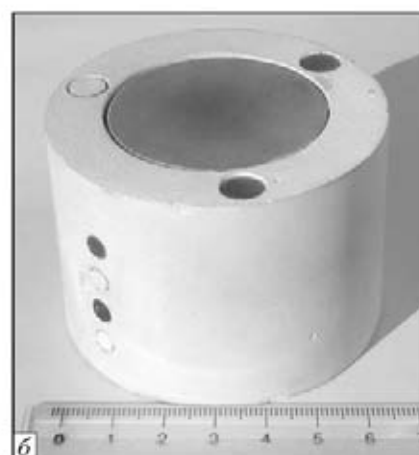
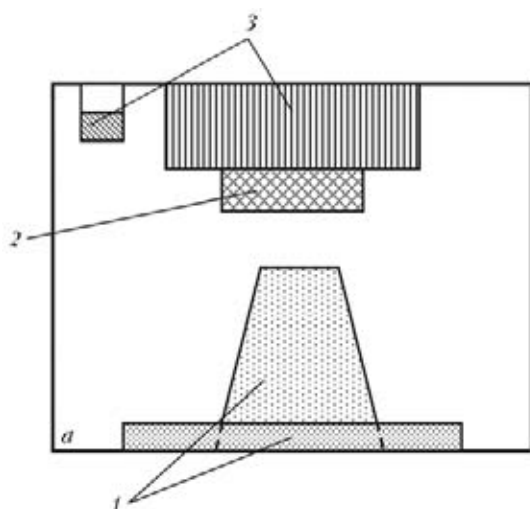


Рис. 1. Схема строения (а) и общий вид композиционного слитка (б): 1 — керамика или смесь керамик; 2 — смесь металлов; 3 — металл, сплав, керамика или органические добавки

© Б. Е. ПАТОН, 2005

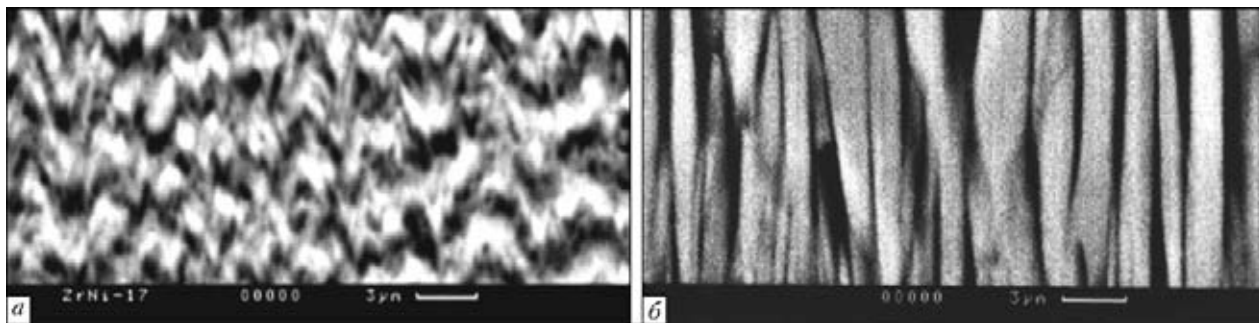


Рис. 2. Структура пористого покрытия  $ZrO_2$  (7 %  $Y_2O_3$ ) с добавкой Ni (а) и NaCl (б)

вой фазы. На рис. 1 приведены схема строения и общий вид композиционного слитка, состоящего из керамической основы и отдельных фрагментов (вставок) металлических и неметаллических материалов. Вставки веществ требуемых формы, размеров и упругости пара при температуре испарения располагаются в объеме слитка таким образом, чтобы при его непрерывном испарении и последующей конденсации паровой фазы на подложке формировался материал с заданными градиентами состава и структуры.

Необходимо отметить также гибридные технологические процессы, включающие ионизацию парового потока основного компонента и/или введение в него из рядом расположенного источника или с помощью композиционного слитка неорганических или органических добавок, взаимодействующих на поверхности конденсации с основным компонентом. В отдельных вариантах это могут быть химические реакции, сопровождающиеся удалением продуктов реакции с поверхности конденсации. Такая «обработка» парового потока позволяет в широком диапазоне регулировать структуру конденсатов (рис. 2).

В качестве примеров существующих и разрабатываемых направлений практического применения парофазных технологий и новых материалов служат защитные и конструкционные покрытия на лопатках газовых турбин различного назначения; твердооксидные топливные ячейки; особо твердые покрытия на инструменте для обработки материалов; катализаторы в виде градиентных пористых покрытий на соответствующих поверхностях (проволоке, ленте, сетке и др.); биоматериалы и биопокрывтия; материалы и покрытия с особыми физическими свойствами (оптическими, электрическими, магнитными и др.).

Полученные к настоящему времени экспериментальные результаты высокоскоростного электрон-

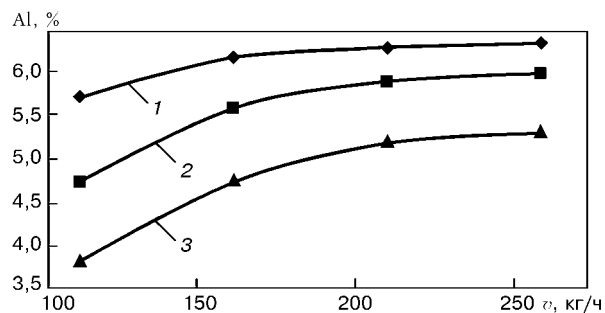


Рис. 3. Зависимость степени испарения алюминия от скорости плавки  $v_{пл}$  при мощности электронно-лучевого обогрева металла в кристаллизаторе 90 (1); 120 (2); 160 (3)

но-лучевого испарения углерода и углеродсодержащих веществ свидетельствуют о возможности применения этой технологии для получения нанотрубок и алмазоподобных структур.

*Электронно-лучевая плавка с промежуточным тиглем.* Развиваются работы в направлении совершенствования технологии электронно-лучевого переплава для производства титановых слитков и полуфабрикатов с использованием более дешевого исходного сырья — титановой губки. В настоящее время НПЦ «Титан», входящий в состав института, может выпускать промышленные партии титановых слитков до 1500 т в год. Из последних достижений следует отметить разработку технологии плавки слитков-слябов сплава ВТ6 с мелкозернистой равноосной структурой.

С помощью моделирования процесса испарения легирующих элементов определена зависимость степени испарения алюминия от скорости плавки и мощности электронно-лучевого обогрева металла в кристаллизаторе. Определено, что при мощности электронно-лучевого обогрева металла менее 120 кВт и скорости плавки более 200 кг/ч содержание алюминия в слитке соответствует требованиям стандарта для сплава ВТ6 (рис. 3).

Построена трехмерная математическая модель переноса тепла во время формирования слитков-слябов. На основе температурного поля сделаны расчеты градиентов температур, скоростей охлаждения и скоростей кристаллизации расплава в каждой точке слитка-сляба титанового сплава ВТ6. Доказана адекватность модели и возможность прогнозирования структуры слитков.

Определен оптимальный технологический режим (мощность электронно-лучевого обогрева металла 90 кВт и скорость плавки 200 кг/ч), позволяющий получать мелкозернистую равноосную структуру по всему поперечному разрезу сляба, что подтверждается анализом макроструктуры слитков-слябов титанового сплава ВТ6 сечением 150×950 мм длиной 2 м (рис. 4).

В ИЭС им. Е. О. Патона способом электронно-лучевой плавки получены слитки-слябы из титанового сплава ПТ-3В с гомогенным химическим составом и структурой, из которых на ОАО «Фео-



Рис. 4. Макроструктура слитка-сляба сплава ВТ6 сечением 150×950 мм



досийская судостроительная компания «Море» изготовили сварные конструкции крыльевых устройств для морских судов толщиной 200...250 мм без разделки сварочных кромок. Использование слитков-слябов позволило увеличить выход годного металла на 10 % и снизить себестоимость на 20 %, по сравнению с традиционной технологией.

Кроме того, в области электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью учеными института впервые в мире созданы технологии и оборудование для выплавки слитков из недробленых блоков губчатого титана; получения высококачественных слитков сложнолегированных титановых сплавов; выплавки полых слитков для производства крупногабаритных титановых труб, а технологию оплавления боковой поверхности слитков успешно применяют вместо их механической обработки.\*

*Электронно-лучевая сварка материалов большой толщины.* Впервые проведены теоретические и экспериментальные исследования спектра собственных колебаний расплавленного металла в парогазовых каналах большой глубины. Установлено, что возникающие под воздействием реакции отдачи испаряющегося металла возмущения в виде капиллярных волн на внутренней поверхности канала имеют дискретный спектр колебаний, первая гармоника которых, характеризующаяся наименьшей частотой и наибольшей амплитудой, оказывает определяющее влияние на стабильность геометрических размеров парогазового канала и образование дефектов в виде различных несплошностей в средней и корневой частях сварных швов. На основании этого установлено, что стабильность парогазовых каналов большой глубины может быть повышена путем наклона плоскости стыка и электронного пучка на угол 10...12° к горизонту. При такой пространственной переориентации сварочной ванны в поле силы тяжести происходит изменение характера собственных колебаний расплава, т. е. превращение их из чисто капиллярных волн, характерных для вертикального канала, в капиллярно-гравитационные. Подобная трансформация колебаний расплава в наклонном парогазовом канале приводит существенному увеличению частот наиболее низких гармоник колебаний, что способствует уменьшению амплитуды возмущений поверхности расплава на передней стенке канала и, как следствие, — повышению стабильности сварочного процесса в целом.

Кроме того, эффективным средством повышения устойчивости формирования глубоких швов оказалось применение развертки с параллельным переносом луча вдоль и поперек направления сварки. Это приводит к снижению усредненной концентрации мощности, выделяемой на стенках парогазового канала, а также к уменьшению количества первичных электронов, достигающих дна канала, что благоприятно сказывается на повышении стабильности парогазового канала в целом. Для этого случая определен оптимальный диапазон частот развертки электронного луча большой мощности

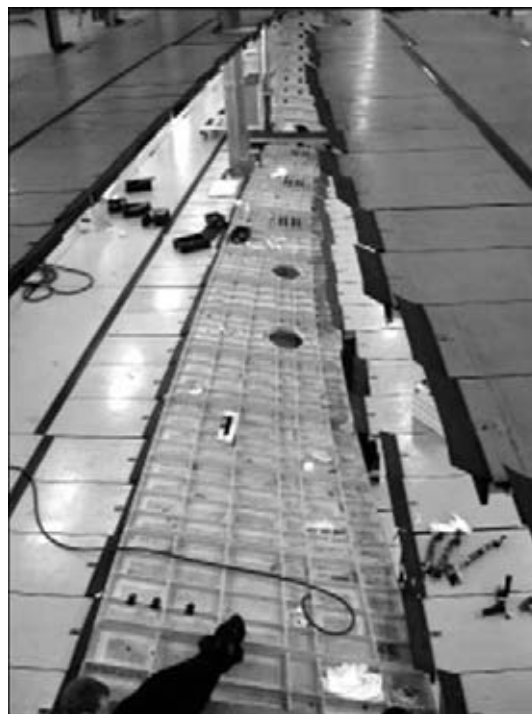


Рис. 5. Сборка крыла аэробуса А-380 в «AIRBUS UK» с применением сваренных электронным лучом крупногабаритных панелей (фото предоставлено фирмой «AIRBUS»)

при электронно-лучевой сварке металлов и сплавов большой толщины.

Результаты исследований легли в основу технологических процессов электронно-лучевой сварки самолетных конструкций (рис. 5), изготавливаемых из высокопрочных алюминиевых сплавов толщиной до 150 мм.

*Выращивание монокристаллов.* Монокристаллы тугоплавких металлов (вольфрам, молибден) являются продукцией «высоких» технологий. Большинство программ в космической атомной энергетике и аэрокосмической технике зависят от прорывов в науке и технике высокотемпературных материалов. Проблема выращивания крупных монокристаллов тугоплавких металлов в течение ряда лет казалась неразрешимой из-за их высокой температуры плавления. Разработанный в институте способ плазменно-индукционного зонного выращивания монокристаллов позволил решить эту проблему. Уникальность способа заключается в том, что для него практически не существует каких-либо ограничений как по размерам, так и по профилю поперечного сечения (круг, квадрат, пластина, труба и т. п.).

Сочетание плазменного и индукционного нагрева (рис. 6) позволяет удерживать ванну жидкого металла в электромагнитном поле без контакта с охлаждаемой медью. Это предопределило перспективы данного способа в выращивании крупных и сверхкрупных (20 × 140 × 170 мм и более) монокристаллов тугоплавких металлов, поскольку увеличение их размеров имеет решающее влияние на расширение масштабов их применения в технике. Ориентированные монокристаллы из вольфрама и мо-

\*Цикл научных работ «Разработка физико-металлургических и технологических основ изготовления и обработки титана и сплавов на его основе и их внедрение в промышленность Украины» (Н. П. Тригуб, В. Н. Замков, С. В. Ахонин, В. В. Тэлин, А. Н. Петрунько, О. М. Ивасишин, С. А. Фирстов, О. А. Жуков, В. А. Трофимов, С. Н. Антонов) выдвинут на соискание Государственной премии Украины в области науки и техники за 2005 г. (Примеч. ред.)



Рис. 6. Схема процесса плазменно-индукционного выращивания сверхкрупных монокристаллов тугоплавких металлов

либдена, особенно профилированные, могут быть идеальной заготовкой для широкоформатного проката из тугоплавких металлов.

*Электрошлаковые процессы в производстве композитных заготовок.* Среди промышленных способов получения композитных, в том числе многослойных и биметаллических заготовок и изделий, особое место занимают способы, основанные на применении электрошлакового процесса: электрошлаковая наплавка (ЭШН), электрошлаковая сварка (ЭШС), электрошлаковый переплав (ЭШП), выгодно отличающиеся от других универсальностью и эффективностью.

В последние годы благодаря разработке в ИЭС им. Е. О. Патона нового технологического процесса электрошлаковой наплавки жидким металлом (ЭШН ЖМ) и новой технологической схемы ЭШП с двумя источниками питания и использованием токоподводящего кристаллизатора открылись новые возможности для совершенствования технологии получения биметаллических заготовок и изделий различного назначения, таких как композитные заготовки прокатных валков, биметаллическая арма-



Рис. 7. Внешний вид промышленного агрегата ЭШН ЖМ на ЗАО «НКМЗ» и заготовки композитного прокатного валка  $\varnothing$  740 мм, наплавленного способом ЭШН ЖМ

тура, подовые сталемедные электроды дуговых печей и др.

Одним из важнейших условий получения качественной композитной заготовки является минимальное изменение химического состава металла наплавленного слоя за счет разбавления его металлом наплавленной заготовки. Исследования изотропности химического состава по высоте и сечению композитных заготовок валков ЭШН ЖМ (образцы вырезали из нижней, средней и верхней частей заготовки) показали практически равномерное распределение основных легирующих элементов как по высоте, так и по сечению наплавленного слоя. Аналогичные результаты получены по замерам твердости на наплавленных заготовках, что свидетельствует об изотропности свойств рабочего слоя композитных заготовок валков, полученных ЭШН ЖМ.

Изучение технологических возможностей ЭШН ЖМ показало, что этот способ имеет целый ряд преимуществ по сравнению с традиционными. Применение ЭШН ЖМ позволяет наплачивать наружные поверхности цилиндрических заготовок практически любого диаметра, толщина наплавленного слоя определяется исключительно требованиями пользователя и может составлять 20...100 мм и более. ЭШН ЖМ характеризуется высокой производительностью процесса, в десятки раз превосходящую производительность традиционных способов (в зависимости от размеров наплаваемых деталей и применяемых материалов составляет 200...800 кг/ч и более).

В рамках совместных работ с ЗАО «НКМЗ» создан первый в мире промышленный агрегат для ЭШН ЖМ (рис. 7), предназначенный для производства композитных заготовок прокатных валков диаметром до 1000 мм, длиной наплаваемой бочки до 2500 мм и массой до 20 т, накоплен значительный опыт по изготовлению заготовок с высокохромистым наплавленным слоем, прежде всего для рабочих валков непрерывных широкополосных станов. Испытания таких валков показали, что их стойкость в 2...3 раза выше по сравнению со стандартными чугунами валками, использовавшимися ранее.

Благодаря разработанной технологии ЭШН ЖМ и особой конструкции применяемого токоподводящего кристаллизатора в процессе наплавки биметаллической заготовки осуществляется постоянное регламентированное вращение шлакометаллического расплава. Это позволяет максимально усреднить температуру и химический состав металлической ванны в поперечном сечении, способствует более равномерному проплавлению основного слоя и получению заданной равномерной толщины наплавленного слоя. Технология ЭШН ЖМ реализована при изготовлении биметаллических заготовок диаметром 350 мм с коррозионно-стойкой наплавкой из аустенитной стали типа 316L и основным слоем из стали 20ГС для биметаллического арматурного профиля 16 мм (рис. 8). Металлографическими исследованиями установлено отсутствие каких-либо дефектов (отслоений, трещин, шлаковых включений и др.) по линии сплавления разнородных сталей.

В качестве подовых электродов современных дуговых печей постоянного тока используют композитные биметаллические заготовки (сталь + медь).

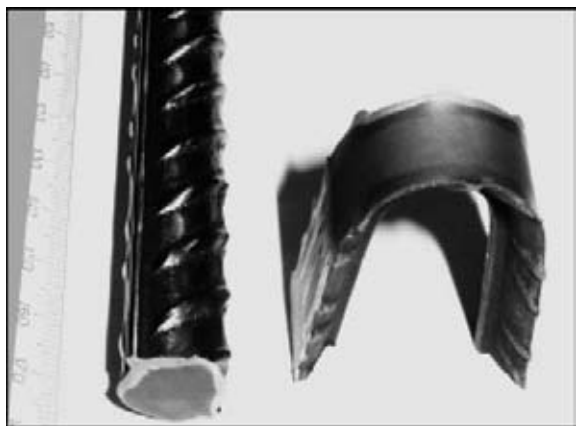


Рис. 8. Внешний вид загнутого образца (продольного макрошлифа) биметаллического арматурного профиля  $\varnothing 16$  мм

В процессе эксплуатации печи стальная часть электрода контактирует с жидким расплавом, а его медная часть является нижним токоподводом и к ней подключают измерительные приборы. От качества разнородного соединения (сталь + медь) во многом зависит надежность подового электрода и эффективность эксплуатации дуговой печи.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработана новая технологическая схема получения биметаллических сталемедных слитков для подовых электродов дуговых печей постоянного тока, основанная на применении электрошлакового процесса в токоподводящем кристаллизаторе по двухконтурной схеме (ЭШП ДС), которая позволяет в широких пределах изменять не только глубину, но и форму металлической ванны. При этом решаются основные проблемы, связанные с обеспечением минимальной протяженности переходной зоны разнородных металлов и получением высококачественного биметалла с гарантированной прочностью соединения слоев. Созданная на основе ЭШП ДС технология обеспечивает получение моноблочных биметаллических слитков (сталь + медь) для подовых электродов диаметром до 350 мм и длиной до 1300 мм (рис. 9). Проведенный комплекс исследований металла биметаллических слитков, в том числе макро- и микроисследования (рис. 10) зоны соединения разнородных металлов (сталь + медь), подтвердил их высокое металлургическое качество и

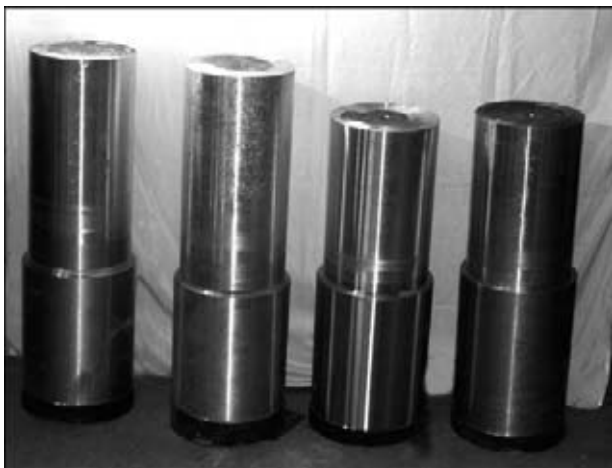


Рис. 9. Промышленная партия сталемедных биметаллических слитков ЭШП ДС  $\varnothing 350$  мм для подовых электродов дуговой печи

соответствие требованиям, предъявляемым к подовым электродам дуговых печей постоянного тока.

**Контактная стыковая сварка.** Контактная сварка оплавлением является наиболее эффективным способом соединения металлов. Это направление успешно развивается, его возможности далеко не исчерпаны. Разработана разновидность способа сварки непрерывным оплавлением, получившая название сварки пульсирующим оплавлением. Этот способ, запатентованный в ведущих странах мира, позволяет почти вдвое снизить длительность процесса сварки и припуски на оплавление (рис. 11), обеспечить высококонцентрированный нагрев. Это открывает новые возможности для соединения трудносвариваемых, разупрочняющихся материалов, а также для расширения областей применения контактной стыковой сварки. На его основе разработаны новые технологии сварки высокопрочных сталей и сплавов разнородных материалов, в частности технология сварки рельсов бесконечной длины при ремонте бесстыковых железнодорожных путей. Необходимый припуск на сварку в данном случае реализуется за счет растяжения свариваемых рельсов. Разработаны компьютеризированные системы автоматического управления основными параметрами, обеспечивающие воспроизводство заданных режимов сварки независимо от усилий натяжения в рельсах. Кроме того, система управления позволяет устанавливать заданный уровень напряжений в рельсовых плетях бесстыкового пути с учетом температуры окружающей среды при сварке. Разработано новое поколение рельсосварочных машин типа К922 для сварки с натяжением, в которых реализованы новые технологии и системы управления. Производство таких машин, пользующихся спросом на мировом рынке, организовано на Каховском заводе электросварочного оборудования.

На основе способа пульсирующего оплавления разработаны новые технологии соединения заготовок проката с большой площадью поперечного сечения (более 20000 мм<sup>2</sup>). Для реализации этих технологий изготовлена новая контактная стыковая машина К1003 (рис. 12).



Рис. 10. Микроструктура ( $\times 320$ ) зоны соединения разнородных металлов (сталь + медь) в биметаллических слитках ЭШП ДС  $\varnothing 350$  мм для подовых электродов дуговой печи

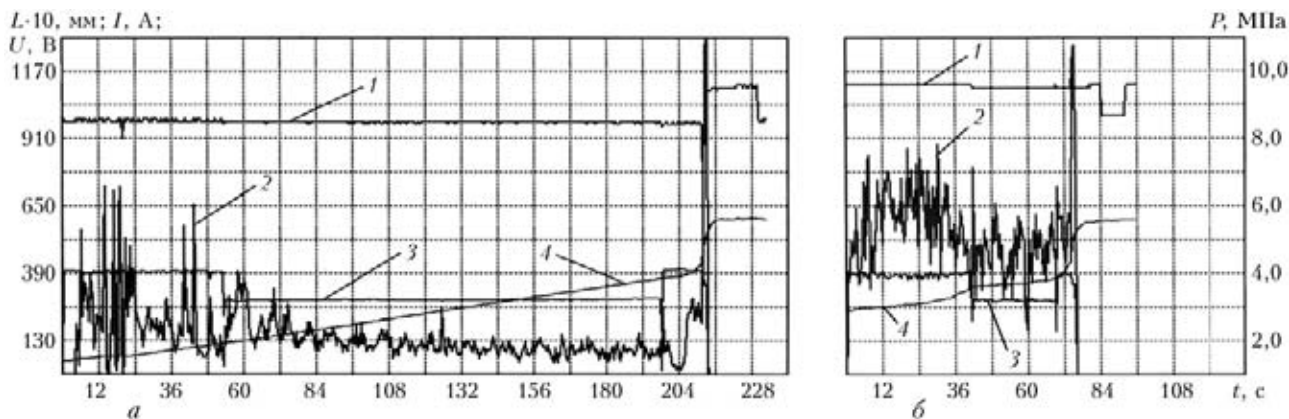


Рис. 11. Основные параметры контактной дуговой сварки рельсов Р 65 с непрерывным (а) и пульсирующим оплавлением (б): 1 — давление; 2 — сварочный ток; 3 — сварочное напряжение; 4 — перемещение

Созданы принципиально новые процессы пресовой сварки с нагревом дугой, управляемой магнитным полем, существенно расширившие технологические возможности способа, в частности сварка труб диаметром до 219 мм с толщиной стенки до 12 мм (традиционный процесс позволяет соединять трубы диаметром до 100 мм при толщине стенки не более 6 мм). Создана гамма универсального и специализированного оборудования для реализации этого технологического процесса.

**Гибридные процессы.** В последние годы в институте сформировалось новое направление в создании наукоемких технологий — гибридные способы сварки. Исследуются процессы, основанные на использовании лазерного излучения и дуги с плавящимся электродом, а также лазерного излучения и плазмы (рис. 13). Разработаны технологии лазерно-дуговой сварки сталей и алюминиевых сплавов, а также комбинированной и гибридной наплавки и поверхностного легирования сталей. Предложена технология многопроходной гибридной сварки (лазер + дуга с плавящимся электродом) сталей больших толщин (рис. 13, а). При ограниченной мощности лазерного излучения (до 3 кВт) этот способ позволяет сваривать за три-четыре прохода низколегированную сталь толщиной до 20 мм (при однопроходной лазерной сварке сталей такой толщины необходима мощность лазерного излучения до 10 кВт). Установлено, что скорость гибридной сварки алюминиевых сплавов может достигать

300 м/ч (для  $\delta = 2$  мм) и более (рис. 13, б). При тех же мощностных параметрах дуги и лазерного пучка скорость дуговой сварки составляет 30...50 м/ч, а лазерной — 60 м/ч. Повышение скорости обусловлено синергетическим эффектом (взаимным влиянием и повышением стабильности составляющих гибридного процесса).

Для нанесения особо тонких слоев износо- и коррозионно-стойких покрытий разработан комбинированный процесс, заключающийся в объединении микроплазменного напыления и лазерной наплавки. Он позволяет устранить основной недостаток лазерной наплавки — трещинообразование, а также повысить плотность напыленных покрытий и прочность их сцепления с основой (рис. 14, а). При этом отпадает необходимость в предварительной подготовке поверхности, необходимой в случае применения микроплазменного напыления. Подобный комбинированный процесс предложено использовать для поверхностного легирования сталей с целью повыше-

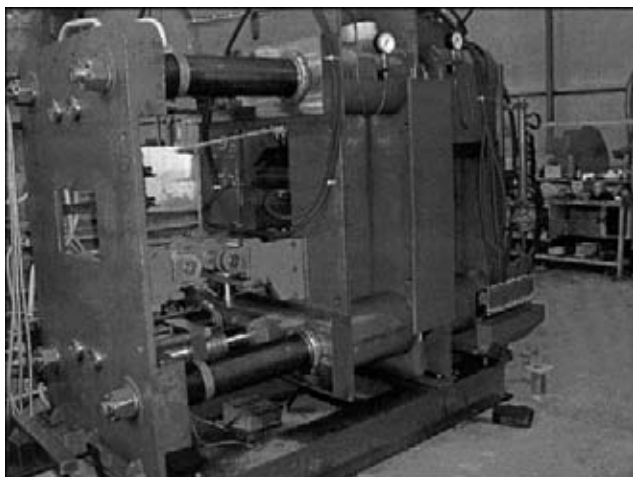


Рис. 12. Контактная машина К 1003 для соединения заготовок проката большого сечения

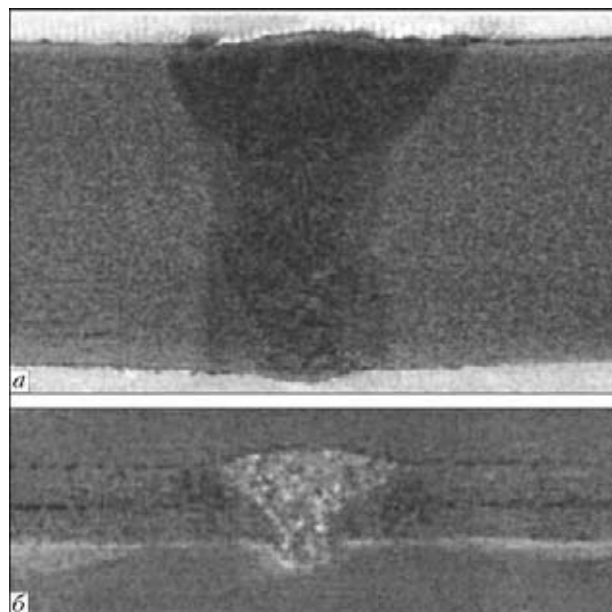


Рис. 13. Макроструктура стыковых соединений, выполненных лазерно-дуговой сваркой: а — сталь Х70 толщиной 18,7 мм, четыре прохода (мощность излучения 2,7 кВт; скорость сварки 25 м/ч; скорость подачи проволоки 400 м/ч,  $\varnothing$  1,2 мм; ток сварки 200 А; напряжение 25 В; защита —  $\text{CO}_2$ ),  $\times 2,5$ ; б — сплав АМг6 толщиной 1,9 мм (мощность излучения 2,5 кВт; скорость сварки 300 м/ч; скорость подачи проволоки 760 м/ч; ток сварки 200 А; защита — Ar),  $\times 5$

ния их твердости и жаростойкости (рис. 14, б). Получение твердых дорожек легирования в более мягкой и пластичной матрице позволяет снизить склонность к образованию сетки разгарных трещин при эксплуатации, например, артиллерийских стволов.

*Сварка мягких тканей животных и человека.* Это совершенно новое для института направление. Издавна известно применение токов высокой частоты для гемостаза — закрытия сосудов с целью прекращения или предупреждения кровотечений при выполнении хирургических операций. Нами показана еще одна область применения тока высокой частоты — для соединения разрезов участков тканей и органов без ниток и металлических скобок, сокращения времени пребывания больного под наркозом, сведения к минимуму попадания в рану продуктов распада, минимизации потерь крови, снижения бактерицидного действия и более во время операции, снижения вероятности метастазирования и потери крови. Техника получения соединений напоминает технологию сварки сопротивлением металлических деталей, отчасти полимерных материалов. Механизм образования соединения существенно отличается. Нагрев ткани протекающим по ней током высокой частоты приводит к денатурации белков, ускорению их теплового движения и возникновению общего белкового пространства, при остывании которого образуется соединение. Остывание сопровождается ренатурацией белков, т. е. восстановлением строения. Однако белковая структура восстанавливается не полностью. Часть молекул претерпевает необратимые изменения и не ренатурирует. Степень ренатурации зависит от наибольшей температуры и времени пребывания ткани при ней. Поскольку необратимое изменение белков нежелательно, сварка должна производиться в сравнительно узких температурных и временных интервалах, что требует автоматического управления с соответствующими обратными связями.

Созданы образцы электрохирургического оборудования (рис. 15), которые, кроме сварки, можно использовать и для гемостаза, а также термической резки тканей. Оборудование применяется в нескольких украинских клиниках не только для выполнения экспериментальных операций, но и в обычной практической работе. Использование сварки оказалось эффективным в общей хирургии, оперативной гинекологии, онкологии, оториноларингологии, операциях на печени, легких и других органах.

Мы намерены и далее развивать работы в области электрохирургии как одним из важнейших направлений современной медицины.

### Совершенствование технологий и материалов

*Математическое моделирование.* Большое внимание при исследовании и оптимизации сварочных технологий уделяется математическому моделированию характерных физических (химических) процессов (явлений), от которых в

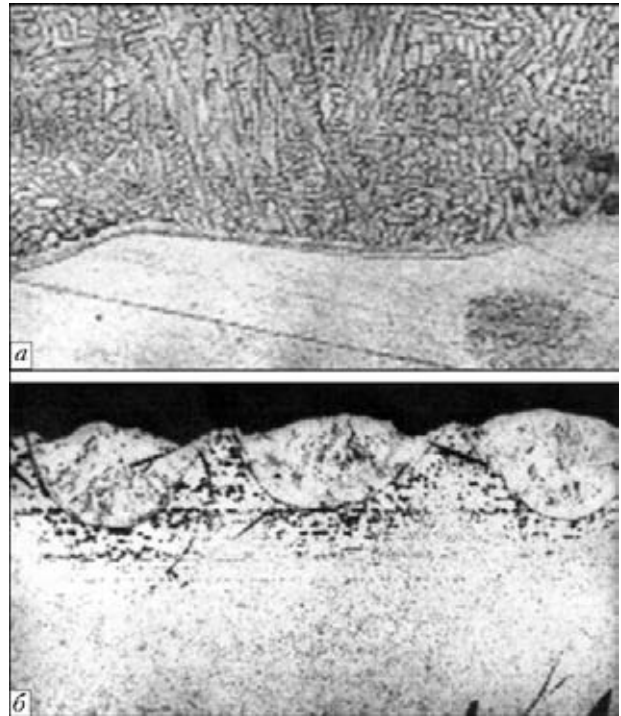


Рис. 14. Микроструктура покрытия из сплава системы Ni-Cr-B-Si, нанесенного на углеродистую сталь,  $\times 1000$  (а) и дорожек лазерно-микроплазменного поверхностного легирования низкоуглеродистой стали хромом,  $\times 32$  (б)

значительной степени зависит качество изделия. Развитие компьютерной техники создает хорошие перспективы для применения достаточно сложных моделей, отражающих многофакторность и взаимосвязь явлений, протекающих при сварке и родственных процессах, что весьма важно для углубления познаний в этой области. Кроме того, компьютеризация математического моделирования делает его доступным для широкого круга пользователей, занимающихся не только исследованием, но и разработкой, а также оптимизацией инженерных решений.

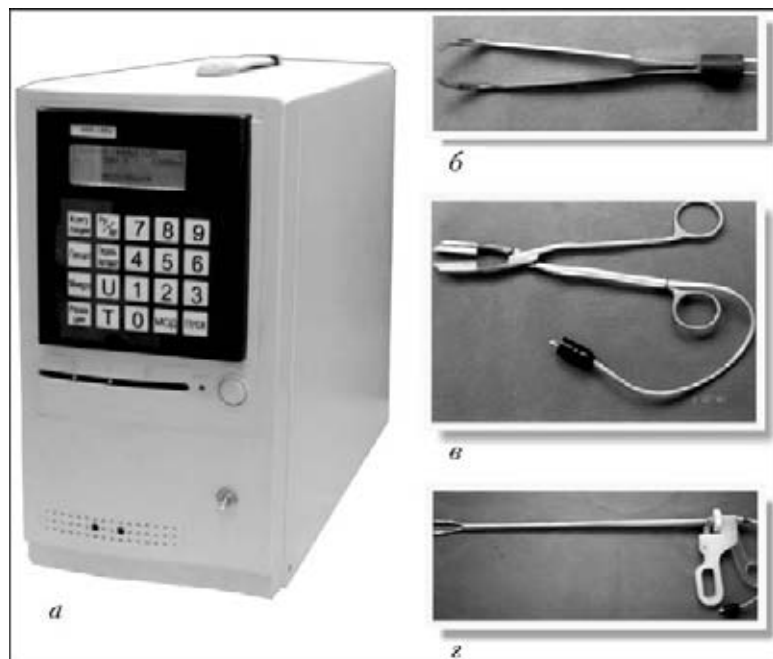


Рис. 15. Медицинские оборудование и инструменты для сварки живых тканей: а — высокочастотный сварочный источник питания; б — сварочный пинцет; в — сварочный зажим; г — лапароскопический зажим

К приоритетным направлениям относится разработка информационно-расчетных систем для характерных типовых задач, представляющих интерес для практики, в частности системы для выбора рационального способа дуговой сварки, сварочных материалов и режимов применительно к сварке конкретной конструкционной стали; определения напряженно-деформированного состояния при сварке кольцевых многопроходных швов одно- и разнородных толстостенных элементов конструкций; определения напряжений и деформаций трубной решетки теплообменников при вварке трубок; прогнозирования напряжений и деформаций, микроструктуры и свойств при наплавке тел вращения типа валов по винтовой линии малого шага с учетом сложных термических циклов в металле ЗТВ и наплавленном слое; создания для стыковой контактной сварки оплавлением (сопротивлением) системы по моделированию связанных полей электрического потенциала, тепловыделений, температур, деформаций и напряжений на основе измеряемых во времени параметров процесса (напряжения силы тока, силы сжатия, перемещения осадки).

*Сварка конструкций из высокопрочных низколегированных сталей.* Работы последних лет посвящены решению проблем сварки конструкций из высокопрочных низколегированных сталей, прежде всего предупреждению хрупкого разрушения сварных соединений, связанного со структурными превращениями и охрупчивающим действием водорода.

Предложен новый физически обоснованный критерий, характеризующий степень снижения хрупкой прочности металла под влиянием водорода, разработана методика применения нового критерия, учитывающего данные механических испытаний.

Главным звеном водородного охрупчивания является поведение зародышевой микротрещины, возникающей в процессе деформации, в присутствии водорода.

Локализация отрицательного заряда на адсорбированных атомах водорода приводит к снижению уровня нормального напряжения, необходимого для перехода микротрещины к автокаталитическому распространению в поле напряжений, что на макроуровне воспринимается как эффект охрупчивания.

Наиболее важными факторами водородной хрупкости являются эволюция дислокационной структуры при пластической деформации, а также свойства границ зерен, частиц второй фазы, неметаллических включений. Особая роль дислокаций в механизме водородной хрупкости обусловлена тем, что их перемещение является основным механизмом пластической деформации и одновременно наиболее эффективным способом транспортирования водорода в объеме металла.

Неметаллические включения в зависимости от их связи с матрицей могут действовать с самого начала деформирования как трещины, а хрупкие включения могут сами инициировать зарождение острых трещин.

Водород в металле шва и ЗТВ снижает удельную энергию поверхности субмикротрещины.

Снижение напряжения хрупкого разрушения, инициируемого субмикротрещиной, возникающей

по дислокационной схеме, пропорционально уменьшению удельной поверхностной энергии металла под влиянием водорода.

Понизить восприимчивость сварного соединения к холодному растрескиванию можно путем введения в металл шва ловушек водорода, которыми являются различные структурные дефекты (вакансии, растворенные атомы, дислокации, границы зерен и фаз, микро- и макropоры, неметаллические включения, частицы второй фазы и т.п.). Эффективно введение в металл шва редкоземельных элементов. Соединения этих элементов сорбируют водород, освобождая от него матрицу металла и тормозят массоперенос водорода в наиболее напряженных участках шва и ЗТВ.

Проведены исследования механизма абсорбции водорода металлом в процессе сварки, оценена роль температуры дуги, полярности тока, температуры расплавленного металла, воздушной среды и аппаратуры для определения водорода в сварочных материалах и сварных соединениях.

Абсорбция водорода из плазмы дугового разряда определяется степенью ее ионизации и зависит от температуры дуги.

Оценка поведения гидроксидов и фтористого водорода в атмосфере дуги показала, что фтор и кислород эффективно взаимодействуют с водородом на периферии столба дуги.

Определены основные источники водорода в сварочных материалах, предложены металлургические и технологические меры, позволяющие снижать содержание водорода в металле сварных соединений и предупреждать образование индуцированных водородом трещин.

Результаты исследований использованы для разработок сварочных материалов — электродов и агломерированных флюсов, обеспечивающих получение ультранизких содержаний водорода в металле швов (до  $1 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ). Это позволяет значительно снизить температуру подогрева изделий.

Создан ряд марок порошковых проволок для сварки толстостенных конструкций металлургического оборудования.

Применение новых низководородных сварочных материалов весьма перспективно в судостроении, при изготовлении тяжелонагруженных машиностроительных металлоконструкций, при строительстве трубопроводов и во многих других отраслях.

Разработана серия электродов для сварки низколегированных сталей повышенной и высокой прочности:

АНО-101, АНО-102 (для сталей с пределом текучести до 460 МПа, с системой легирования Si-Mn, Si-Mn-Ni-Cu);

АНО-100 (для сталей с пределом текучести до 550 МПа, с системой легирования Si-Mn-Cr-Ni-Cu);

АНО-103 (для сталей с пределом текучести до 650 МПа, с системой легирования Si-Mn-Mo).

Созданы следующие новые агломерированные флюсы для сварки низколегированных сталей:

АНК-561 (флюс алюминатно-основного типа для сварки сталей с пределом текучести до 490 МПа, с системой легирования Mn-Si-Ni);

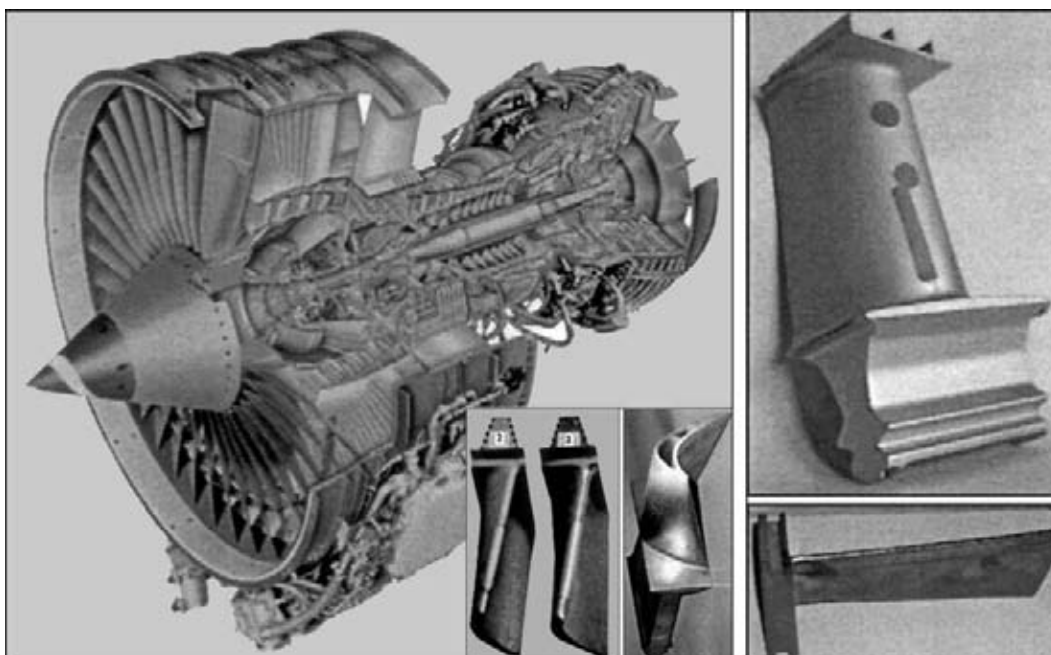


Рис. 16. Рабочие и сопловые лопатки из никелевых суперсплавов

АНК-57 (флюс флюоритно-основного типа для сварки сталей с пределом текучести до 590 МПа, с системой легирования Mn–Si–Ni–Mo–Ti).

**Электрошлаковая сварка.** Созданы аппараты нового поколения для ЭШС проволочными электродами: АД381 (двухэлектродный монтажный аппарат для сварки толщин 30... 60 мм) и АШ 115М (для сварки криволинейных стыков толщиной металла до 200 мм).

Аппарат АД381 успешно применен при ремонте и сооружении корпусов кожухов доменных печей и корпусов конвертеров из низколегированных сталей. Аппарат позволил выполнить все вертикальные укрупнения и монтажные стыки, что значительно повысило производительность монтажа.

Проведены работы по увеличению в два и более раз скорости ЭШС с одновременным снижением тепловложения с целью увеличения производительности и отказа от послесварочной термообработки. Основной принцип — управление зоной выделения тепла и электрогидродинамикой шлаковой и металлической ванны. Управление реализуется за счет варьирования траектории протекания тока в шлаковой ванне путем соответствующего подключения и коммутации токоподводов к электродам и свариваемому изделию.

Осуществляются исследования по разработке способа электрошлаковой сварки или наплавки неподвижными плавящимися секционными электродами большого сечения в узком зазоре для толстого металла, который позволяет получать сварные швы большой толщины без применения сложной сварочной аппаратуры и дефицитной сварочной проволоки. Процесс может управляться по заданной программе. В настоящее время достигнута толщина соединения в 600 мм.

Разработаны и успешно применяются системы стабилизации тока, напряжения и контроля уровня металлической ванны.

**Сварка высоколегированных сталей и сплавов.** Авиационные двигатели, а также газотурбинные ус-

тановки (ГТУ) наземного или морского применения являются очень важной и наиболее наукоемкой частью современной транспортной техники. Совершенствование их технических характеристик (эффективной мощности, стоимости, влияния на экологию, эксплуатационного ресурса и др.) представляет собой сложные конструкторскую, материаловедческую и технологическую задачи. Во всем мире интенсивно работают над их решением. Необходимы ключевые технологии, открывающие новые возможности для применения перспективных материалов с особыми свойствами и позволяющие на их основе создать новые конструктивные решения.

Институт совместно с такими ведущими специализированными организациями Украины, как «Прогресс» и «Мотор Сич» (г. Запорожье), «Заря-Машпроект» (г. Николаев,) МНПО им. М. В. Фрунзе (г. Сумы), осуществляет исследовательские и опытно-промышленные работы по двум направлениям — создание ремонтных технологий с целью продления ресурса авиационных и газотурбинных двигателей и разработка технологий по реализации концепции получения цельносварных моноблоков ГТУ нового поколения на основе неразъемных соединений элементов ГТУ из перспективных материалов.

Продление ресурса ГТУ базируется на обосновании возможности и создании технологий многократного восстановления эксплуатационных характеристик сопловых и рабочих лопаток, элементов диска, жаровых камер, уплотнительных элементов и других высоконагруженных частей ГТУ. В институте совместно с промышленными предприятиями разрабатываются новые технологии восстановления и ремонта практически всех видов изделий из жаропрочных никелевых сплавов, в том числе сплавов нового поколения (на основе интерметаллидов) с содержанием  $\gamma$ -фазы до 70 % и более (рис. 16).

Освоены технологии соединения сплавов с поликристаллической направленной и монокристаллической структурой без нарушения их структурной

ориентации в месте соединения и с сохранением заданного уровня свойств.

В комбинации со специальными видами термообработки и нанесения современных функциональных покрытий удается увеличить ресурс элементов в действующих агрегатах в 1,5... 3,0 раза.

Создание цельносварных моноблоков ГТУ становится возможным благодаря применению новых технологий соединения, учитывающих свариваемость материалов. К ним относятся микроплазменная наплавка и напыление, реактивно-диффузионное соединение, сварка с использованием гибридных видов микроразряда. Институтом предложена новая концепция оценки свариваемости различных материалов, базирующаяся на том, что свариваемость является физическим свойством материала, которым можно управлять. На основе такого подхода созданы новые процессы, позволяющие получить моноблоки рабочих лопаток с диском (рис. 17) или рабочих колес (рис. 18) с высокими эксплуатационными характеристиками и ресурсом.

**Сварка титана и титановых сплавов.** Ведутся работы по созданию новых конструкционных хорошо свариваемых титановых сплавов для аэрокосмической техники, химического машиностроения, медицины и др. Разработан опытный сплав Т-110 ( $Ti-5,5Al-1,2Mo-1,2V-4Nb-1,8Fe$ ), по уровню прочности не уступающий известному сплаву ВТ22 и хорошо свариваемый как при дуговом, так и при электронно-лучевом способах сварки. Сварные соединения сплава Т-110 после термической обработки имеют удовлетворительные характеристики пластичности при уровне прочности не менее 95 % этого показателя основного металла (1100 МПа), а долговечность сварных соединений при нагрузке 600 МПа составляет  $5 \cdot 10^6$  циклов.

Стойкость в агрессивных средах является одной из важнейших характеристик титана, определяющих его широкое применение в химическом машиностроении. Наиболее высокой коррозионной стойкостью отличаются технический титан и его сплавы с палладием. Однако их прочность не превышает 500 МПа. Коррозионная стойкость высокопрочных промышленных титановых сплавов уступает по этому показателю техническому титану.

Исследования показали, что повысить прочность титана без снижения его коррозионной стойкости можно, если в качестве легирующих элементов использовать изоморфные  $\beta$ -стабилизаторы, в частности молибден, ванадий, ниобий. На этой основе разработан титановый сплав системы  $Ti-4,5Al-2,5V-2,5Mo-3,5Nb-1,5Zr$ , прочность которого (950 МПа) почти вдвое превышает прочность технического титана, а его коррозионная стойкость под напряжением не уступает этому показателю технического титана.

Теоретические и экспериментальные исследования в области химически чистых галогенидных



Рис. 17. Диск с рабочими лопатками

флюсов для сварки титана и сплавов на его основе легли в основу создания принципиально новых (применительно к титану) способов сварки. К ним относится автоматическая сварка плавящимся электродом под флюсом, электрошлаковая сварка титана, аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом по слою флюса (А-ТИГ), сварка в узкий зазор магнитоуправляемой дугой.

Разработаны порошковые титановые проволоки и технологии сварки титана вольфрамовым электродом в аргоне. Этот процесс позволяет выполнять однопроходные швы без разделки кромок на титане толщиной до 16 мм. Созданы технологии механизированной сварки титана неплавящимся электродом и соответствующее оборудование для сварки в заводских и монтажных условиях. Ведутся исследования по активации металлургических процессов при электронно-лучевой сварке титана с помощью соответствующих флюсов.

**Сварка композиционных, разнородных и трудно-свариваемых металлов.** Соединения разнородных и трудно-свариваемых металлов требуют дозированного высококонцентрированного введения тепла в зону соединения с целью минимизации термического влияния на свойства основного металла и уменьшения возможности образования хрупких интерметаллидных фаз. Для решения этой задачи предложено использовать при контактной сварке давлением композиционные вставки и наноактиваторы, размещаемые между соединяемыми деталями. Состав материала и форма вставок рассчитываются так, чтобы иметь возможность повышать переходное сопротивление в стыке, что в свою очередь приводит к высококонцентрированному нагреву соединяемых деталей. Это претворяет их упрочнение и обеспечивает механические свойства на уровне одного из свариваемых металлов. Наноактиватор, используемый одновременно со вставками, защищает металл шва, а также способствует формированию вокруг околшовной зоны структур, свободных от оксидов, что уменьшает вероятность образования хрупких интерметаллидных фаз в соединении. Разработанная технология нашла применение при сварке дисперсно-упрочненной меди, алюминия со сталью и меди с вольфрамовыми сплавами (рис. 19).

**Сварка взрывом.** Изучены условия образования соединений при соударениях с минимально допустимыми скоростями. Результаты этих исследований используются для разработки «сходящих» технологических режимов сварки применительно к изготовлению элементов металлоконструкций, чувствительных к уровню остаточных пластических дефор-



Рис. 18. Фрагмент рабочего колеса ГТУ



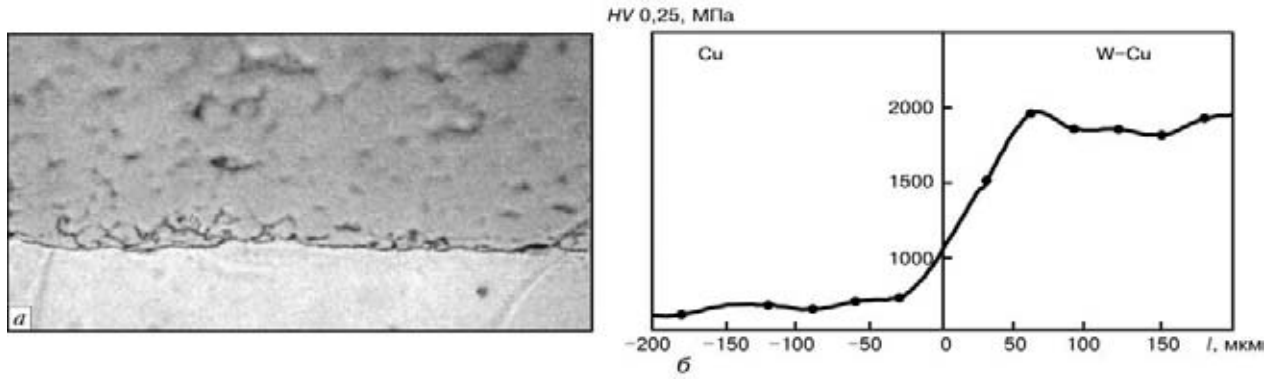


Рис. 19. Микроструктура металла соединения меди с вольфрамовым сплавом (а) и распределение микротвердости в нем (б);  $l$  — расстояние

маций и риску их разрушения. Определено влияние различий плотности и твердости при соединении разнородных материалов. Изучено влияние шероховатости соединяемых поверхностей и сформулированы рекомендации по рациональному выбору степени чистоты их механической обработки. Отработаны приемы химической подготовки соединяемых поверхностей при сварке высокопрочных алюминиевых сплавов с пониженной способностью к высокоскоростному пластическому деформированию. Показано, что предварительная химическая обработка позволяет соединить эти сплавы без промежуточных прослоек из более пластичного металла.

На рис. 20 в системе координат угол соударения — скорость точки контакта изображена типичная для металлов область свариваемости взрывом. Оптимальными являются технологические режимы, прилежащие к нижней границе этой области. Полученные результаты позволили разработать технологические режимы сварки взрывом в полосе (заштрихована) шириной в несколько градусов ниже традиционной нижней границы (рис. 20).

Основными пользователями разрабатываемых на основе проводимых исследований технологий являются электротехническая промышленность и цветная металлургия, нуждающиеся прежде всего в надежных биметаллических переходниках для высоконадежных электрических цепей. Для машиностроения и металлургии созданы технологии изготовления трубчатых переходников переменного сечения из разнородных металлов (рис. 21) и нанесения на крупногабаритные изделия защитных покрытий (антикоррозионные, износостойкие и жаростойкие).

**Пайка.** Традиционно большое внимание в институте уделяют фундаментальным и прикладным исследованиям в области пайки, в частности соединению перспективных трудносвариваемых материалов (интерметаллидных, дисперсно-упрочненных, жаропрочных никелевых сплавов), созданию тонкостенных, в том числе многослойных, конструкций. Разработаны новые припои для высоколегированных никелевых сплавов (например на основе системы Ni-Cr-Zr), имеющие новый качественный уровень по сравнению с традиционными и позволяющие значительно расширить объем применения конструкционной и ремонтной пайки в современном двигателестроении.

Созданы припои и технология пайки сплавов на основе интерметаллидов, в частности  $\gamma$ -TiAl. Проч-

ность соединений, полученных с использованием разработанных припоев, близка к таковой основного металла при комнатной и высокой (700 °С) температурах, а также при испытании на длительную прочность.

Разработаны припои, технология и оборудование пайки в вакууме решетчатых конструкций, например рулей ракет. Создание карусельной установки позволило значительно повысить производительность вакуумной пайки.

Большие перспективы для производства тонкостенных конструкций открывает дуговая пайка. Значительное снижение погонной энергии, отсутствие разбрызгивания, подрезов, хорошая поверхность швов — далеко не полный перечень ее преимуществ. Она позволяет, в частности, соединять оцинкованное железо без потери защитного слоя.

Весьма перспективными для промышленного применения являются результаты исследований в области пайки алюминия и его сплавов. Так, реактивный флюс для пайки алюминия позволяет паять без припоя. Последний образуется вследствие реакций компонентов флюса с алюминием. Новый флюс — хорошая основа для создания высокоэффективных технологий в серийном производстве автомобильных радиаторов, излучающих антенн и других изделий.

**Защитные покрытия.** Дальнейшее развитие получили работы в области нанесения функциональных покрытий различного назначения (износостойкие, коррозионно- и жаростойкие, биоактивные и др.) способами газотермического напыления, диффузионного насыщения и электроискрового легирования. Разрабатывается оригинальное оборудование

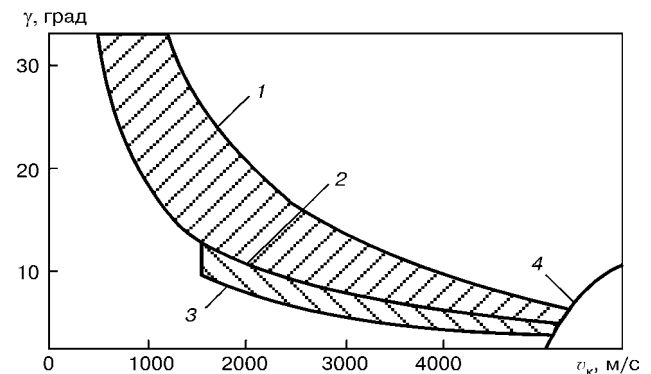


Рис. 20. Область свариваемости взрывом (СВ): 1 — верхняя; 2, 3 — нижние; 4 — звуковая границы СВ

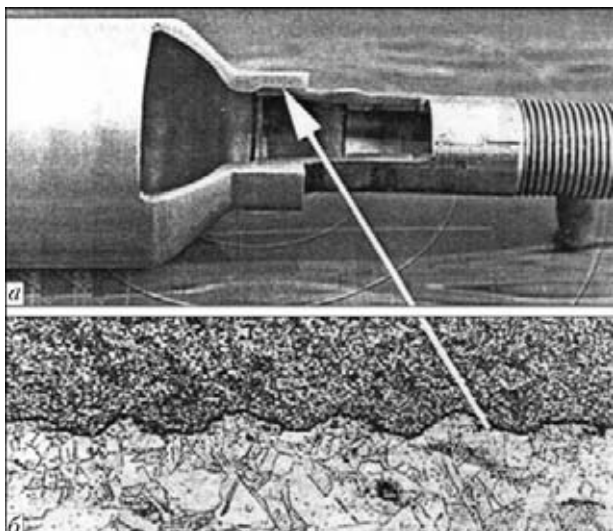


Рис. 21. Трубчатый переходник (а) и микроструктура металла соединения (б)

и материалы для получения покрытий (порошки, порошковые проволоки), технологии нанесения покрытий.

Разработанная установка для микроплазменного напыления МПН-004, отличающаяся малыми габаритами (масса 14 кг), низким уровнем шумовыделения (30... 50 дБ), малым размером пятна напыления (1,0... 5,0 мм), позволяет напылять покрытия из материалов широкого круга (металлы, сплавы, оксиды, карбиды и др.). Технология микроплазменного напыления биокерамических покрытий используется для нанесения биоактивных покрытий из гидроксипатита на различные типы эндопротезов (рис. 22). Установлена возможность получения таким путем текстурированных биокерамических покрытий. Наличие текстуры стимулирует процесс ресорбции (растворения) материала покрытия. Разработанная технология позволяет управлять фазовым составом и текстурой биокерамического покрытия, что обеспечивает возможность получения покрытий с оптимальными свойствами.

Работы в области квазикристаллических покрытий, наносимых способом сверхзвукового воздушно-газового напыления (установка «Киев-С»), привели к созданию покрытий с теплопроводностью

1,5... 2,0 Вт/(м·град), перспективных для использования в качестве теплозащитных, в частности в двигателях внутреннего сгорания, изготовляемых из алюминиевых сплавов.

Ведутся работы по развитию гибридной лазерно-дуговой технологии получения покрытий, отличающейся возможностями объединения процессов нанесения покрытий и синтеза в газовой фазе, например для осаждения алмазных и алмазоподобных покрытий.

### Ресурс безопасной эксплуатации сварных конструкций

Определенный ресурс безопасной эксплуатации современных сварных конструкций закладывается еще на стадии их проектирования и изготовления. Однако при длительной эксплуатации ответственных конструкций (мостов, магистральных трубопроводов, крупных нефте- и газохранилищ и т. д.) ресурс их эксплуатации периодически определяют на основе мониторинга реальной нагруженности конструкций; технической диагностики их состояния с позиций наличия дефектов несплошности и формы, уровня остаточных нерелаксированных напряжений, степени изменения характеристик сопротивления материала в горячих точках под влиянием тех или иных видов нагружения; расчетных кодов, связывающих нагруженность и результаты технической диагностики для комплексного определения ресурса безопасной эксплуатации.

В сварных конструкциях «горячими точками» зачастую являются сварные соединения. В институте интенсивно ведутся работы, связанные с созданием расчетных кодов для сварных соединений на основе современных подходов механики разрушения с учетом рекомендаций Международного института сварки, Американского института нефти и др. Пример такой работы — создание совместно с Госнефтегазпромом ведомственных строительных норм Украины «Расчеты на прочность действующих магистральных трубопроводов с дефектами» (ВБН В.2.3-00018201.04-2000).

Традиционно институт много внимания уделяет определению остаточных напряжений в различных сварных соединениях и узлах. Успешно используется комбинированный метод, основанный на мате-

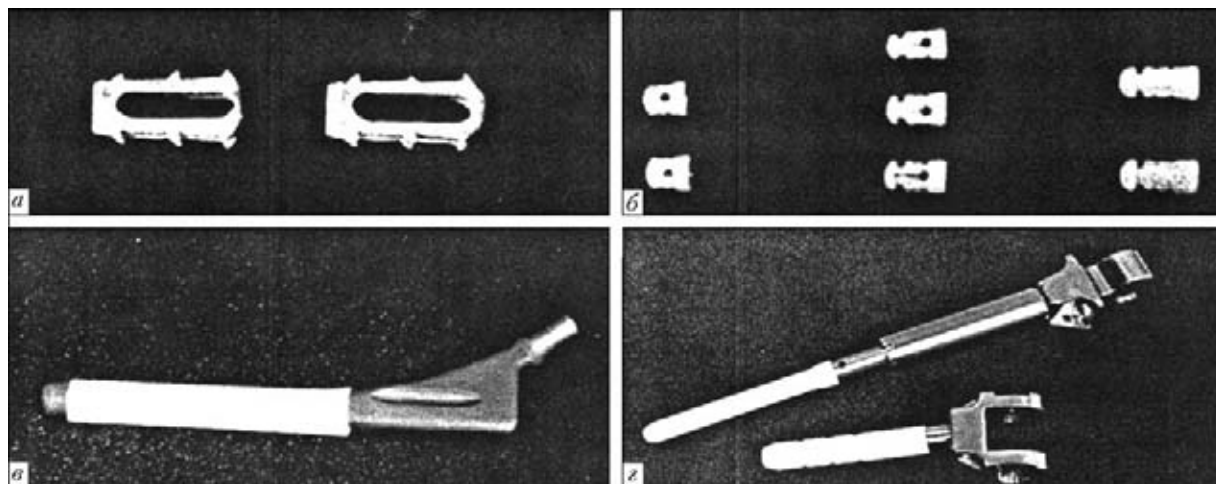


Рис. 22. Эндопротезы с микроплазменными биокерамическими покрытиями: а — межпозвонковый; б — зубные; в — тазобедренный; г — коленный

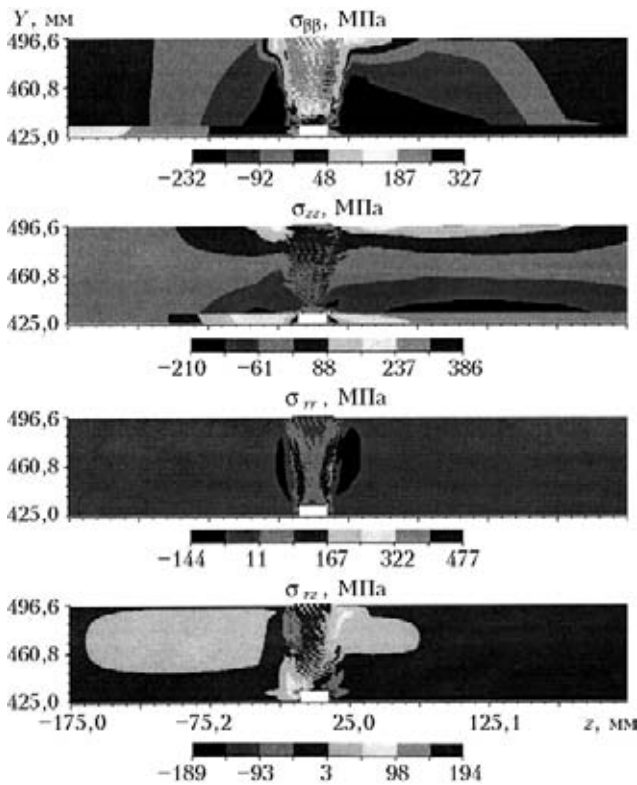


Рис. 23. Расчетные данные по распределению остаточных сварочных напряжений после сварки и отпуска кольцевого стыка труб Ду 850

матическом моделировании кинетики образования остаточных напряжений при сварке и последующей термической обработке во всем объеме сварного узла в сочетании с экспериментальными измерениями в доступных поверхностях исследуемого узла. Такой подход был осуществлен применительно к сварным соединениям труб Ду 850, с помощью которых парогенератор атомного реактора ВВЭР-1000 крепится к трубопроводу первого контура.

На рис. 23 приведены расчетные данные по распределению остаточных напряжений  $\sigma_{\phi\phi}$  (окружных),  $\sigma_{zz}$  (поперечных),  $\sigma_{rr}$  (радиальных),  $\sigma_{rz}$  (касательных).

На рис. 24 видно достаточно хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных для наружной поверхности (доступной для измерений) относительно  $\sigma_{\phi\phi}$  и  $\sigma_{zz}$ , что является основой валидации расчетных данных.

Создан новый оперативный метод и компактная автоматизированная аппаратура для неразрушающей оценки напряженного состояния, обусловленного как изготовлением конструкций, так и эксплуатационными нагрузками. Суть технологии состоит в создании новой неразрушающей оценки упругой разгрузки напряжений (релаксации) на основе введения высокоплотного импульса тока в контролируемый участок и бесконтактного определения поля перемещений в зоне релаксации методом электронной спекл-интерферометрии (рис. 25).

Компьютерная автоматизированная система позволяет вычислить напряжения на основе данных о перемещениях в локальной зоне релаксации.

Одной из новых технологий оценки работоспособности сварных конструкций, разработанных в институте, является технология на основе квантовой

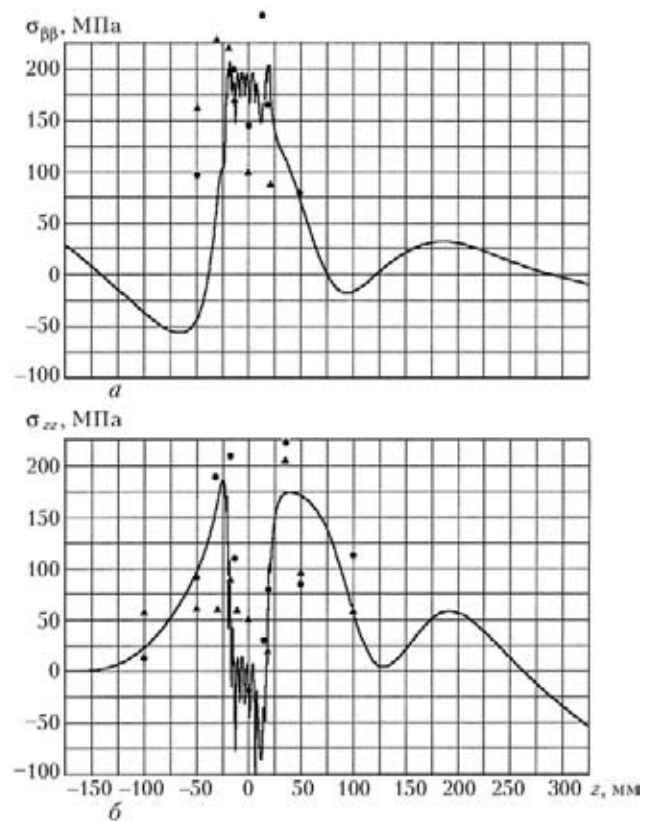


Рис. 24. Сопоставление расчетных кривых остаточных напряжений  $\sigma_{\phi\phi}(z)$  (а) и  $\sigma_{zz}(z)$  (б) на наружной поверхности в зоне стыка труб Ду 850 после высокого отпуска с экспериментальными данными

механики разрушения, использующая наряду с традиционными параметрами, характеризующими состояние материалов, данные его акустической эмиссии, излучаемой материалом в процессе деформирования. Использование новой технологии целесообразно при акустической эмиссии в объеме 100%-го контроля конструкций и их узлов. Работы по контролю с использованием данной технологии могут выполняться без остановки производства и предполагают автоматическую оценку опасности обнаруженных дефектов.

Применение разработанной технологии для контроля материалов конструкций позволяет осуществить 100%-й контроль конструкций и их узлов без разрушения, заблаговременно определить разрушающую нагрузку, оценить остаточный ресурс материала конструкции. За последние 12 лет использования разработанной технологии в различных отраслях промышленности разных стран испытано более 1000 конструкций (объекты энергетики, химической промышленности, газотранспорта и аммиакопроводы).

Большое будущее, на наш взгляд, у диагностических систем непрерывного мониторинга конструкций, позволяющих в течение длительного времени непрерывно получать информацию о состоянии конструкций. Такие системы уже более трех лет работают на некоторых предприятиях Украины. На рис. 26 показан непрерывный мониторинг типичной конструкции крупногабаритного хранилища аммиака объемом 34 тыс. м<sup>3</sup> и аммиакотрубопровода длиной 1000 м на мосту через реку Днепр.

Расширение областей применения алюминиевых сплавов в сварных конструкциях зависит от обес-

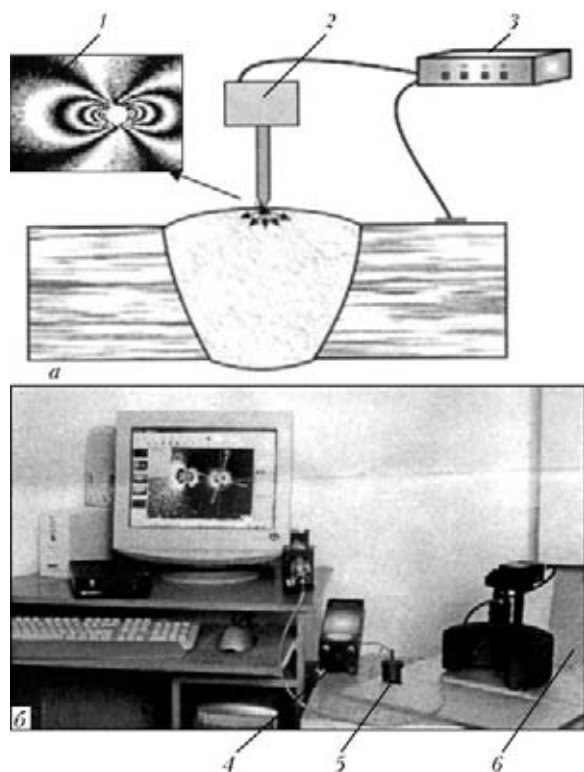


Рис. 25. Схема (а) и аппаратное оформление (б) метода оценки напряженного состояния: 1 — интерференционная картина, характеризующая остаточные напряжения; 2, 5 — устройство ввода импульсов тока; 3 — генератор импульсов; 6 — спекл-интерферометр

печения требуемого сопротивления соединений усталостным разрушениям. Циклическая долговечность сварных соединений алюминиевых сплавов составляет около 40 % соответствующего показателя соединений конструкционных сталей. Поэтому сварные алюминиевые конструкции в большей степени, чем стальные, нуждаются в послесварочной обработке. Исследования показали, что эффективным способом послесварочной обработки сварных соединений алюминиевых сплавов может стать поверхностное пластическое деформирование зоны перехода от шва к основному металлу высокочастотной механической проковкой. Иллюстрацией этого служат результаты усталостных испытаний стыковых сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 в исходном состоянии, после механической зачистки выпуклости и высокочастотной механической проковки с применением технологического оборудования со сравнительно небольшой потребляемой мощностью (до 0,3 кВт) с пьезокерамическим преобразователем (рис. 27). Повышение сопротивления усталости стыкового соединения алюминиевого сплава АМг6 после обработки, по сравнению с исходным состоянием, в зависимости от асимметрии цикла составило 45... 100 %.

*Ультразвуковой контроль (УЗК)* является одним из основных способов обнаружения внутренних дефектов в сварных соединениях. Традиционно он реализуется с помощью пьезоэлектрических преобразователей. В качестве иллюстрации успешного применения УЗК может служить серия автоматизированных установок с системой УЗК с компью-

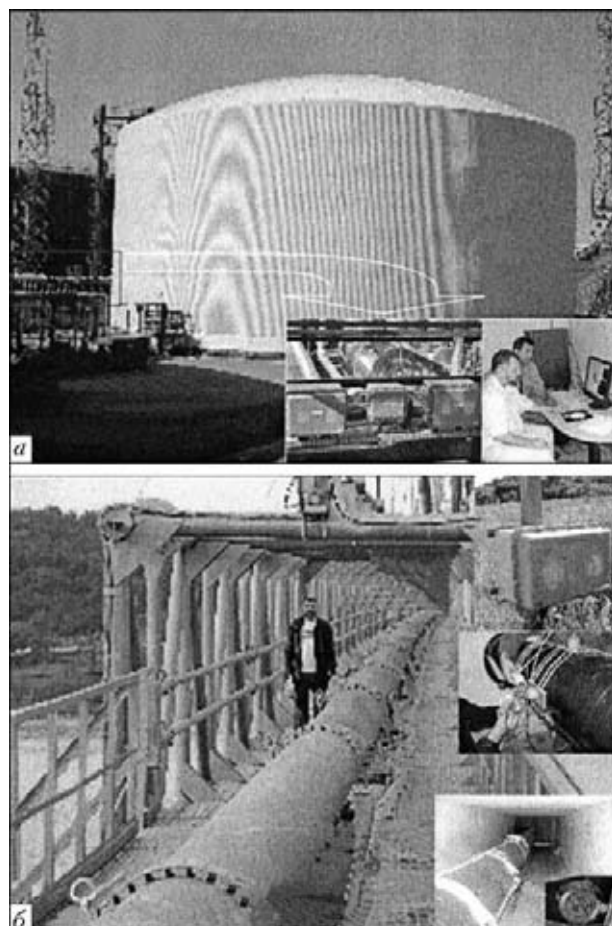


Рис. 26. Непрерывный мониторинг хранилища аммиака (а) и аммиакотрубопровода на мосту через Днепр (б)

терным управлением, разработанных и изготовленных в институте для Выксунского металлургического комбината (рис. 28). Они обеспечивают автоматизированный УЗК концов труб диаметром 508... 152 мм по всей толщине стенки 7... 50 мм, выявление дефектов типа «расслоение» на ширине 60 мм от торца, продольно ориентированных дефектов типа «трещина» на ширине 30 мм от торца трубы, а также продольных швов прямошовных сварных труб.

В институте впервые установлено, что в ряде случаев для УЗК сварных соединений и листовых конструкций более целесообразно использовать электромагнито-акустические преобразователи (ЭМАП), исключая необходимость в промежуточной акустической среде (контактной жидкости), но позволяющие возбуждать особые горизонтально-поляризованные поперечные волны. Это дает возможность производить УЗК изделий с грубой поверхностью без опорожнения объекта и при наличии остатков изоляции инородных наслоений. Испытания показали, что с достоверностью 97 % выявляются все естественные дефекты (округлые, протяженные разной ориентации) без влияния на результаты УЗК формы валика усиления сварного соединения. Кроме того, отпадает необходимость в ожидании остывания металлоконструкции после сварки. ЭМАП могут работать при температуре от -50 до 170 °С. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности расширения областей использования УЗК.

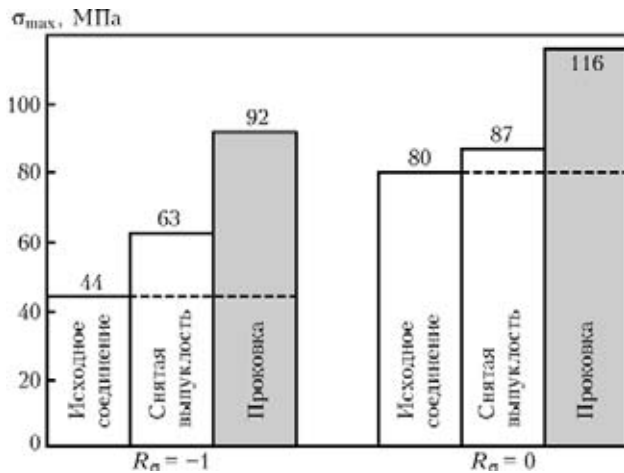


Рис. 27. Изменение значений предела ограниченной выносливости  $\sigma_{max}$  при  $T = 1 \cdot 10^5$  циклов в зависимости от способа обработки сварного соединения сплава АМгб и асимметрии цикла  $R_n$  переменных напряжений

### Некоторые проблемы транспорта природного газа

Институт занимается совершенствованием монтажной сварки магистральных трубопроводов, сварочными материалами, созданием аппаратов для монтажной дуговой сварки, а также другими работами, лишь отчасти связанными со сваркой.

*Повышение эффективности газотранспортных систем.* Газотранспортные системы России и Украины являются энергетическими объектами планетарного масштаба. Природный газ, транспортируемый в магистральных трубопроводах, удовлетворяет потребность в энергии промышленности и социальной инфраструктуры целого континента.

Так, только один трубопровод диаметром 1,4 м транспортирует газ до 800 кг/с при средней скорости движения газа в трубопроводе около 40 км/ч. За год один трубопровод транспортирует массу газа, эквивалентную по энергии 340 млрд кВт·ч (примерная производительность трубопровода 10000 кВт·ч/с).

При подобном масштабе транспортируемой, а, значит, и потребляемой энергии чрезвычайно актуальны проблемы снижения любых видов потерь и повышения эффективности работы газотранспортной системы, с одной стороны, и утилизации тепловых вторичных энергетических ресурсов, связанных с потерями в газоперекачивающем оборудовании, — с другой. Последнее очень важно для соблюдения экологических требований, предъявляемых к мощным энергетическим объектам (Киотский протокол).

В среднем для транспортирования газа в упомянутом магистральном газопроводе на каждые 120...150 км устанавливается компрессорная станция суммарной механической мощностью на валу около 50 МВт.

В настоящее время эффективным является использование на компрессорных станциях газотурбинных установок мощностью на валу 10, 16 и 25 МВт. Современные затраты топливного газа на один газотурбинный двигатель составляют до  $(2...3) \cdot 10^3$  кг/ч. Удельный расход газа на получение механической мощности лежит в пределах 0,33...0,35 м/(кВт·ч).

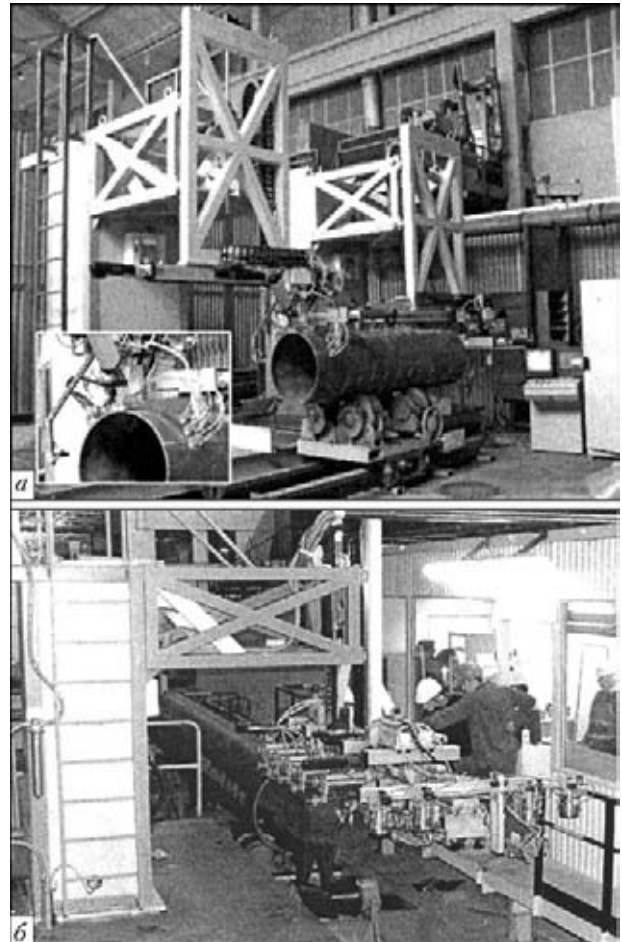


Рис. 28. Установки НК 360 (а) и НК 362 (б) для автоматизированного УЗК труб

Затраты только на топливный газ для работы турбин нагнетателей газа компрессорных станций одного трубопровода длиной до 1500 км составляют около 150 млн дол. США. При этом газотурбинные двигатели выбрасывают в окружающую среду из теплового тракта приблизительно 180 кг/с продуктов сгорания при температуре 400...550 °С. Коэффициент полезного действия этих энергетических установок составляет не более 32 %, что свидетельствует о масштабах выбросов в атмосферу тепловой энергии компрессорных станций, составляющих около 60...70 % потребляемой ими энергии (или до 100 МВт тепловой энергии). При этом непосредственно из теплового тракта газотурбинных двигателей выбрасывается до 60 МВт тепловой мощности. Эту энергию на каждой компрессорной станции можно использовать для дополнительного производства около 16...25 МВт электроэнергии и многих других целей.

Другой эффективный путь — это выработка холода с помощью установок, утилизирующих тепло газотурбинных двигателей. Использование этих установок для охлаждения транспортируемого газа позволит примерно на 8...10 % повысить производительность магистральных трубопроводов, компенсировать затраты электроэнергии на привод вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения газа, обеспечить собственные потребности компрессорной станции в электроэнергии, а также сэкономить топливный газ, потребляемый газотурбинными двигателями.

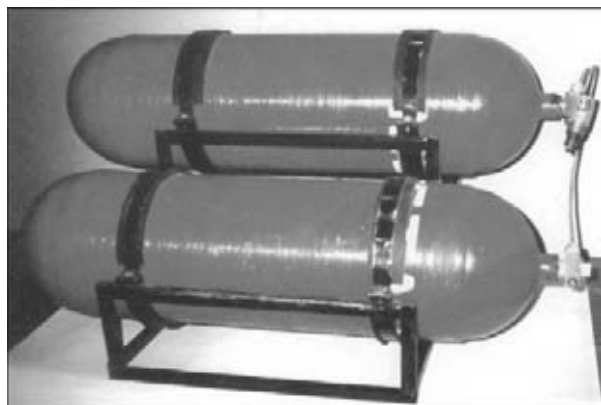


Рис. 29. Облегченные металлопластиковые баллоны для транспортных средств

Зимой возможно производство дополнительной энергии для потребностей предприятий, жилых комплексов или сельскохозяйственных производств, расположенных около компрессорных станций.

Только в газотранспортной системе Украины экономия затрат на транспортирование газа на 5... 10 % даст значительный экономический эффект, снизит экологическую нагрузку на окружающую среду, улучшит энергетическую обеспеченность и условия жизни населения вблизи компрессорных станций. При этом будет повышена пропускная способность трубопроводов. Для газотранспортной системы России этот эффект будет существенно больше.

Над решением этой проблемы наряду с учеными ИЭС им. Е. О. Патона работают сотрудники Института технической теплофизики и Института газа НАН Украины, а также Одесской государственной академии холода, ОАО «ИГШ «ВНИПИТРАНСГАЗ» и ОАО «Сумское МНПО им. М. В. Фрунзе».

*Облегченные металлопластиковые баллоны для транспортных средств* (рис. 29). Мировой автопарк вносит более 70 % загрязнений атмосферы, поэтому весь мир уделяет большое внимание применению природного газа-метана в качестве альтернативного экологически чистого моторного топлива. Наряду с экологической безопасностью применение природного газа стимулируют его цена и значительные природные запасы. Одной из причин, сдерживающих широкое применение газа на транспорте, является большая масса баллонов высокого давления.

В настоящее время на рынке в основном предлагаются три типа баллонов — металлические, пластиковые и металлопластиковые.

Баллоны первого типа, лучшие варианты которых имеют коэффициент массового совершенства  $M/V$  около 1,25 кг/л, изготавливаются из бесшовных цельнотянутых труб.

У баллонов второго типа этот показатель значительно лучше — около 0,3 кг/л, но высокие цены на конструкционные материалы и трудоемкость изготовления обуславливают их высокую стоимость — до 20 дол./л.

Более универсальны баллоны третьего типа. Они имеют несущий газонепроницаемый металлический корпус и упрочняющую композиционную оболочку. Значительного снижения массы и трудоемкости изготовления можно добиться путем применения высокопрочных сталей и композиционных материалов, характеризующихся высокой удельной прочностью. В ИЭС им. Е. О. Патона разработана новая технология изготовления относительно дешевых легких баллонов, корпуса которых выполнены из высокопрочных сталей, а упрочняющая композиционная оболочка — кольцевой намоткой. Баллоны рассчитаны на рабочее давление 20 МПа с запасом прочности 3,1 при  $M/V$  около 0,6 кг/л, на срок эксплуатации более 15 лет и имеют безосколочное разрушение при давлении менее 60 МПа и простреле пулей калибра 7,62 мм.

Металлический корпус этих баллонов изготавливается из высокопрочной листовой стали. Сварку обечайки, днищ и горловины выполняют по технологии, гарантирующей получение сварных соединений, равнопрочных с основным металлом.

Усиление цилиндрической части баллона композиционным материалом позволяет снизить его массу и повысить работоспособность при многократных заправках без уменьшения коэффициента запаса прочности, а также исключить возможность осколочного разрушения.

По конструкции, материалам, трудоемкости и весовым параметрам баллон ИЭС им. Е. О. Патона не уступает лучшим мировым образцам и отличается от них недефицитностью материалов, стабильностью массы, чистотой и однородностью внутренней поверхности, повышенной коррозионной стойкостью и долговечностью при многоцикловых нагрузках. Технологический процесс позволяет без существенного переоборудования производства изготавливать баллоны различных типоразмеров. Баллоны могут быть использованы не только на транспорте, но и в коммунальной сфере, сельскохозяйственной технике, при аварийно-спасательных работах. В настоящее время серийное производство таких баллонов осваивают на трех предприятиях Украины.

В заключение следует отметить, что сварка и родственные процессы продолжают интенсивно и всесторонне развиваться. Создаются теоретические предпосылки для разработки и использования новых технологий, усовершенствованных материалов для изготовления изделий как в традиционных областях сварочного производства, так и в других, которые раньше считались экзотическими. И в XXI веке сварка и родственные процессы сохраняют ведущую роль во многих областях деятельности человека.

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

Поступила 06.06.2005



УДК 669.187.56.001.1

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО АРМАТУРНОГО ПРОФИЛЯ С КОРРОЗИОННО-СТОЙКИМ ПЛАКИРУЮЩИМ СЛОЕМ ИЗ СТАЛИ 316L

Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко, А. Г. Ремизов, В. М. Ярош

Рассмотрены особенности структуры биметаллического арматурного профиля диаметром 16 мм с коррозионно-стойким плакирующим слоем из стали 316L, прокатанного из наплавленной способом ЭШН ЖМ биметаллической заготовки диаметром 350 мм. Приведены результаты макро- и микроисследований зоны соединения основного и плакирующих слоев, изучено распределение химических элементов в зоне соединения.

Peculiar features of bimetal reinforcement profile of 16 mm diameter with a corrosion-resistant clad layer of steel 316L, rolled from 350 mm diameter bimetal billet after cladding by the ESR LM method, are described. Results of macro- and microexaminations of the zone of joining the base and cladding layers are given and distribution of chemical elements in the joining zone is studied.

**Ключевые слова:** биметаллический арматурный профиль; биметаллическая заготовка; зона соединения основного и плакирующего слоев; электрошлаковая наплавка

В работе [1] предложена расчетная методика конструирования наплаваемых способом электрошлаковой наплавки жидким металлом (ЭШН ЖМ) биметаллических заготовок, предназначенных для

производства биметаллического арматурного профиля посредством горячей прокатки. Кроме того, с помощью диаграммы А. Шеффлера проведена оценка ожидаемой структуры металла наплавки стали типа 316 L биметаллической заготовки диаметром

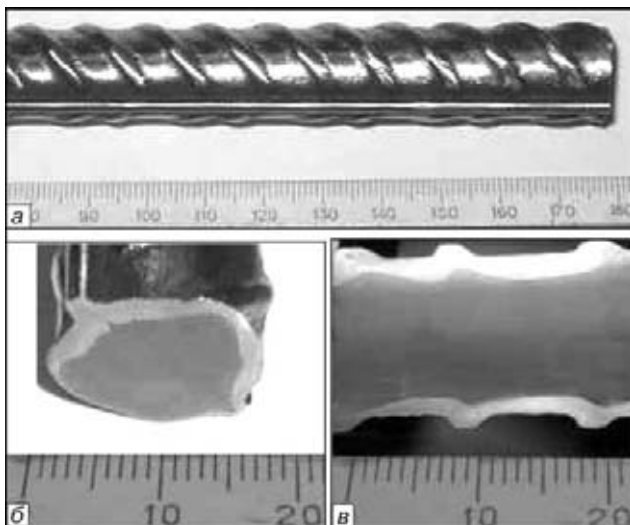


Рис. 1. Внешний вид исследуемого образца (а) биметаллического арматурного профиля диаметром 16 мм и вырезанных из него поперечного (б) и продольного (в) макрошлифов

Таблица 1. Химический состав сталей слоев биметаллического арматурного профиля

Марка стали	Массовая доля элементов, %					
	C	Cr	Ni	Mn	Si	Mo
20ГС (основной металл)	0,19	—	—	1,28	1,11	—
316L (плакирующий слой)	0,03	17	12	—	—	2,5

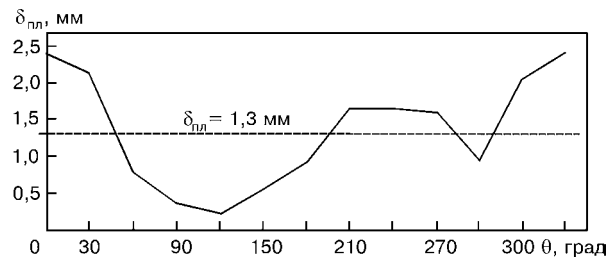


Рис. 2. Фактическая развертка колебания толщины плакирующего слоя  $\delta$  по периметру биметаллического профиля арматурного профиля диаметром 16 мм;  $\theta$  — угол развертки

© Л. Б. МЕДОВАР, В. Я. САЕНКО, А. Г. РЕМИЗОВ, В. М. ЯРОШ, 2005



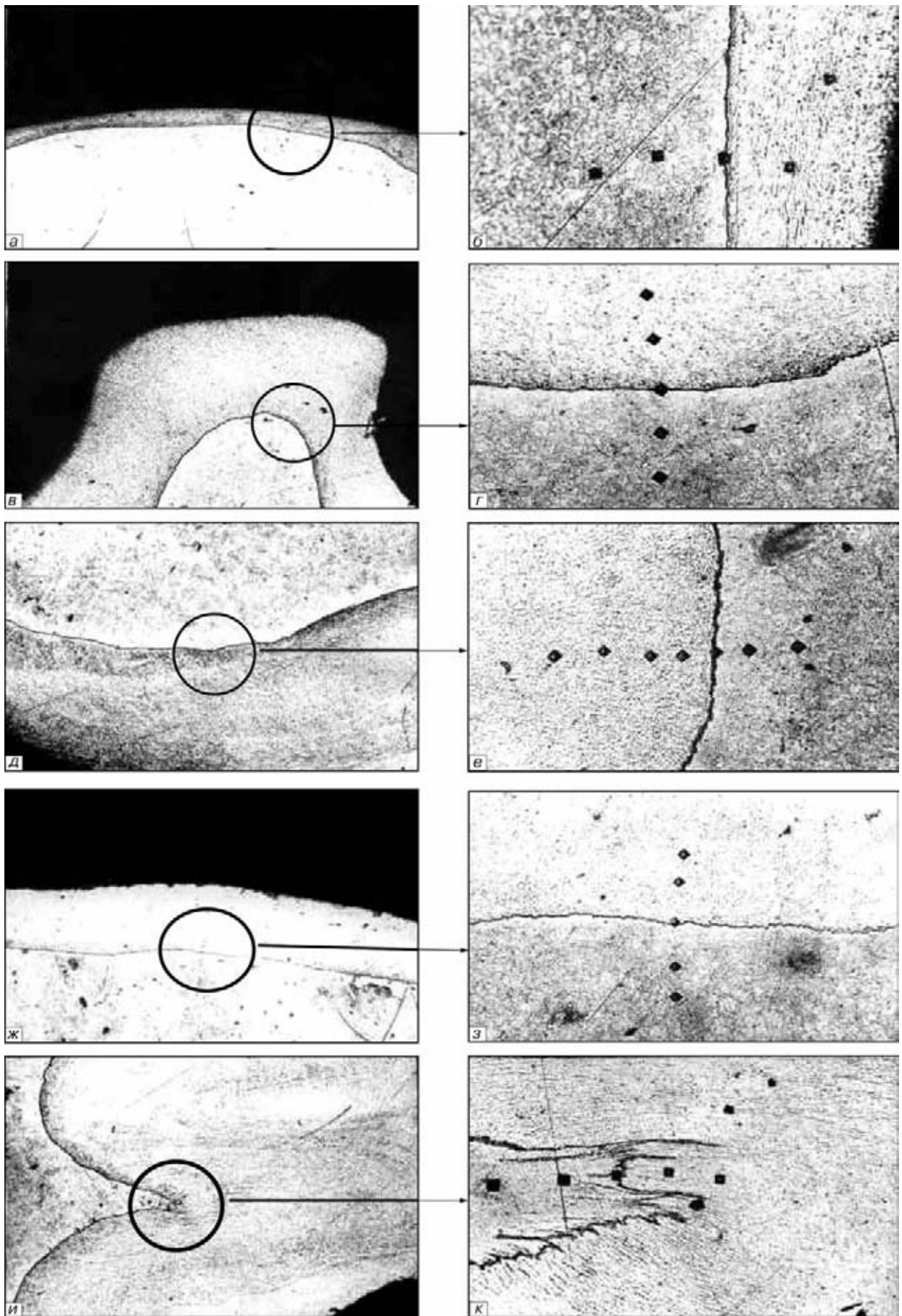


Рис. 3. Микроструктура зоны соединения основного и плакирующих слоев биметаллического арматурного профиля для участков с разной толщиной плакирующего слоя: а, в, д, ж, и –  $\times 50$ ; б, г, е, з, к –  $\times 320$





**Таблица 2. Характеристика металла зоны сплавления разнородных сталей в биметаллическом арматурном профиле**

Толщина плакирующего слоя, мм	Вид зоны сплавления на рис. 3	Микротвердость, HV		
		Нержавеющая сталь	Линия соединения	Арматурная сталь
0,16	а, б	236	234	210
1,30	в, г	221	210	223
1,60	д, е	217	208	187
1,85	ж, з	244	271	213
2,40	и, к	231	286	173

Примечание. Приведены средние значения по результатам трех измерений.

350 мм в зависимости от принятых режимов ЭШН ЖМ и химического состава основного слоя арматуры. При этом принимали, что в процессе ЭШН ЖМ обеспечиваются заданные равномерные глубина проплавления основного слоя и распределение химических элементов по сечению наплавляемого коррозионно-стойкого слоя.

В настоящей работе исследовали реальную макро-микроструктуру и распределение химических элементов в зоне соединения основного и плакирующего слоев биметаллического арматурного профиля диаметром 16 мм, полученного посредством горячей прокатки биметаллической заготовки диаметром 350 мм с плакирующим коррозионно-стойким слоем толщиной 25 мм из стали типа 316L и основным слоем из стали 20ГС (табл. 1).

Преимуществом ЭШН ЖМ является возможность производить наплавку плакирующего металла за один проход, при этом толщина наплавляемого слоя в биметаллическом слитке может быть задана в широких пределах (20... 120 мм и более). Благодаря разработанной технологии процесса и особой конструкции токоподводящего кристаллизатора в ходе наплавки биметаллической заготовки происходит постоянное регламентированное вращение шлако-металлического расплава. Это позволяет максимально усреднять температуру и химический состав металлической ванны в поперечном сечении, способствует более равномерному проплавлению основного слоя и получению заданной одинаковой толщины наплавленного плакирующего слоя.

Вместе с тем, необходимо учитывать [2], что даже при обеспечении последнего из-за особенностей ее неравномерной деформации при прокатке через блюм можно получить значительную разнотолщинность плакирующего покрытия по периметру сечения биметаллического арматурного профиля.

Для исследований специально выбраны образцы биметаллического профиля диаметром 16 мм, отличающиеся разнотолщинностью (0,16... 2,40 мм) плакирующего слоя по периметру их поперечного сечения (рис. 1). Следует отметить, что несмотря на разнотолщинность плакирующего слоя по сече-



Рис. 4. Внешний вид загнутого образца (продольного макрошлица) биметаллического арматурного профиля диаметром 16 мм

нию биметаллического арматурного профиля выхода основного металла на поверхность ни в одном случае не было обнаружено.

Проведенные макроисследования на поперечных образцах показали, что суммарная площадь, приходящаяся на плакирующий слой, составляет 31,2... 31,7% общей площади поперечного сечения биметаллического арматурного профиля, т. е. объемный коэффициент плакирования  $n_{пл}$  составляет в среднем 31,5%. В соответствии с результатами работы [1], при  $n_{пл} = 31,5\%$  ожидаемая средняя толщина плакирующего слоя в готовом арматурном биметаллическом профиле при условии равномерного распределения по периметру поперечного сечения должна составлять 1,3 мм (рис. 2).

Как видно из рис. 2, фактическая разнотолщинность плакирующего слоя в готовом арматурном профиле возникает исключительно из-за неравномерной деформации слоев биметаллической заготовки при прокатке через блюм.

Проведенные микроисследования зоны соединения основного и плакирующих слоев биметаллического арматурного профиля для участков с разной толщиной (0,16... 2,40 мм) плакирующего слоя (рис. 3) показали, что его микроструктура для всех исследуемых участков — аустенитная, каких-либо дефектов (отслоений, трещин, шлаковых включений и др.) по линии сплавления разнородных сталей не обнаружено. Отсутствуют и характерные для зоны соединения разнородных сталей (аустенитная сталь—перлитная сталь) карбидная гряда и обезуглероживенная область, обычно образующиеся вблизи линии сплавления в аустенитной и перлитной сталях. Последнее подтверждается также результатами замеров микротвердости в соответствующих

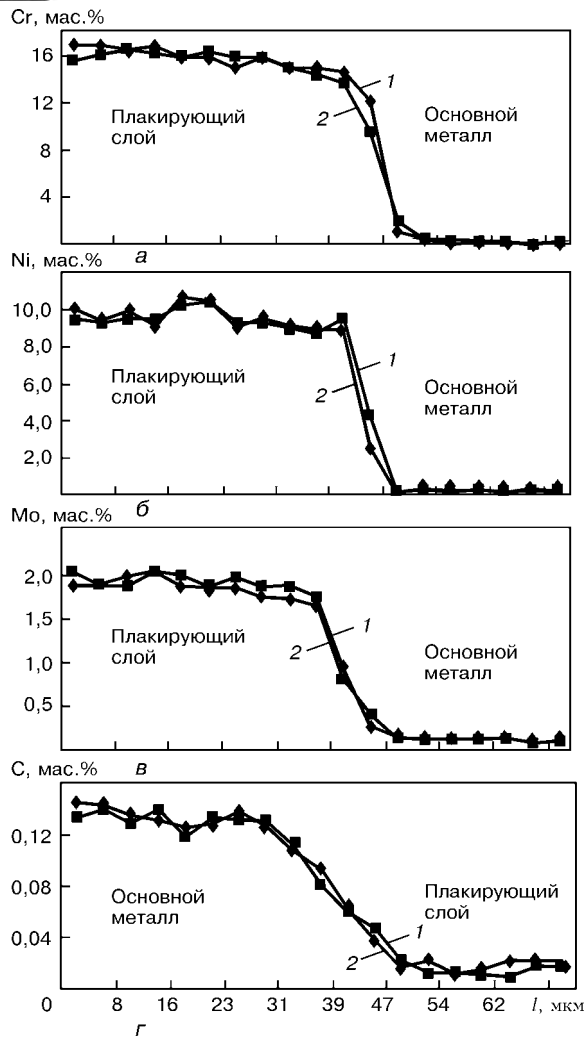


Рис. 5. Распределение элементов в переходной зоне соединения основного и плакирующих слоев биметаллического арматурного профиля для участков с разной толщиной плакирующего слоя: а – хром; б – никель; в – молибден; г – углерод; 1 – 0,16; 2 – 2,40 мм; l – протяженность зоны соединения

структурных зонах. Значения микротвердости по линии сплавления составляют  $HV$  210...234, плакирующего слоя  $HV$  221...236 и основного металла  $HV$  183...212, т. е. практически находятся на одном уровне (табл. 2).

О высоком качестве металла зоны соединения разнородных сталей в биметаллическом профиле свидетельствует отсутствие расслоений в загибном образце (рис. 4). Для испытаний на холодный загиб (ГОСТ 1683) использовали продольный макрошлиф толщиной, равной половине диаметра профиля. Загиб производили на оправке диаметром два диаметра профиля, при этом поверхность макрошлифа загибалась наружу.

Одной из задач настоящей работы являлось исследование распределения химических элементов (углерод, хром, никель, молибден) в зоне соединения разнородных сталей биметаллического арматурного профиля. Рентгеноспектральный микроанализ проводили на образцах, вырезанных поперек направления прокатки, на участках с разной толщиной (0,16...2,40 мм) плакирующего слоя. Результаты микроанализа приведены на рис. 5.

Анализ полученных результатов показал, что протяженность переходной зоны составляет 6...12 мкм и не зависит от толщины плакирующего слоя.

Таким образом установлено, что зона соединения сталей 20ГС–316L свободна от малопластичных структурных составляющих, различных несплошностей и экзогенных неметаллических включений. Это, а также наличие минимальной переходной зоны (6...12 мкм) свидетельствуют о высоком качестве соединения слоев биметаллической арматуры диаметром 16 мм с коррозионно-стойким плакирующим слоем из стали 316L, прокатанной из биметаллической заготовки диаметром 350 мм, наплавленной способом ЭШН ЖМ.

1. Особенности конструирования биметаллических заготовок для производства арматурного профиля с коррозионно-стойким плакирующим слоем из стали 316L // Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко, В. И. Ус, В. М. Ярош // Современная электрометаллургия. – 2005. – № 2. – С. 5–9.
2. Патон Б. Е., Медовар Л. Б., Саенко В. Я. О перспективах производства биметалла с применением электрошлакового процесса // Там же. – 2004. – № 3. – С. 5–9.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
Поступила 04.07.2005



УДК 621.74.043:669.187.56

## ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЕ КОКИЛЬНОЕ ЛИТЬЕ СПЛОШНЫХ РОГОВЫХ СЕРДЕЧНИКОВ

Е. Н. Еремин, С. Н. Жеребцов

Предложена новая технология производства сплошных роговых сердечников, включающая электрошлаковую плавку расходного электрода в плавильном тигле, модифицирование расплава тугоплавкими частицами и последующую его заливку вместе со шлаком в кокиль. Описано оборудование для осуществления этого процесса. Приведены результаты сравнительного анализа литого металла, показаны преимущества технологии.

New technology is offered for production of solid horn-shaped cores, including electroslag melting of consumable electrode in melting crucible, modifying of molten metal by refractory particles and its subsequent pouring together with slag into chill mould. Equipment for realizing of this process is described. Results of comparative analysis of cast metal are given and advantages of the technology are shown.

**Ключевые слова:** электрошлаковое кокильное литье; никелевые сплавы; модифицирование; структура; механические свойства; жаропрочность; роговой сердечник

В химической, нефтяной, газовой и других отраслях промышленности широко используют крутоизогнутые трубные отводы различных диаметров. Их изготавливают с помощью гидропресса, который проталкивает нагретые мерные трубные заготовки по специальному инструменту — протяжке. Главной деталью протяжки является роговой сердечник, изготавливаемый из жаропрочного материала, поскольку он работает при высоких температурах и испытывает большие механические нагрузки, воспринимаемые при движении отвода по сердечнику [1]. Сама протяжка состоит из трех частей: сердечника, проставки и хвостовика, соединенных посредством сварки. В серийном производстве сердечников используют хромоникелевые стали типа 25–20, характеризующиеся хорошей свариваемостью. Однако механические и жаропрочные свойства таких материалов не обеспечивают высокий уровень прочности и износостойкости сердечников, в результате срок их эксплуатации составляет всего 200... 250 ч, что позволяет изготавливать лишь 16000... 18000 отводов [2].

Результаты проведенных исследований подтверждают эти данные и показывают, что даже при строгом соблюдении технологии изготовления сердечника способом плавки в индукционной печи и соответствии его химического состава техническим условиям на используемую сталь, свойства литого металла не обеспечивают необходимую стойкость роговых сердечников в составе протяжки.

Исследования сердечника с Ду76, отлитого по серийной технологии и разрушившегося в процессе эксплуатации в поперечном направлении, показало,

© Е. Н. ЕРЕМИН, С. Н. ЖЕРЕБЦОВ, 2005

что излом на участке разрушения хрупкий, крупнозернистый (рис. 1). В макроструктуре исследованной в произвольном сечении детали обнаружены две зоны: по периферии — крупные столбчатые дендриты, в центре — относительно равноосные зерна.

В микроструктуре на фоне крупных зерен  $\gamma$ -твердого раствора зафиксированы характерные выделения, свидетельствующие о высокотемпературном окислении металла в процессе работы в атмосфере продуктов сгорания топлива с повышенным содержанием серы. Следовательно, для изготовления таких сердечников целесообразно использовать жаропрочные никелевые сплавы. В то же время применение для этих целей сложнолегированных никелевых сплавов ограничено их очень плохой свариваемостью.

Таким образом, наиболее приемлемым материалом является сплав ЭП-202 (ХН67ВМТЮ), рекомендуемый для изготовления сварных изделий [3].

Основным процессом получения отливок из жаропрочных сплавов является литье по выплавляемым моделям в горячие керамические формы в вакуумных индукционных печах, что обуславливает очень большую трудоемкость изготовления изделия и крайне низкую рентабельность производства.

В то же время плохие литейно-технологические свойства таких сплавов и высокие требования к качеству отливок неизбежно влекут за собой низкий выход годного металла, а также значительный процент брака при использовании традиционных способов литья.

Из изложенного следует, что проблема разработки новых технологий получения деталей из жаропрочных сплавов требует незамедлительного решения.

В последние годы в производстве изделий из высоколегированных сталей и сплавов одно из ве-

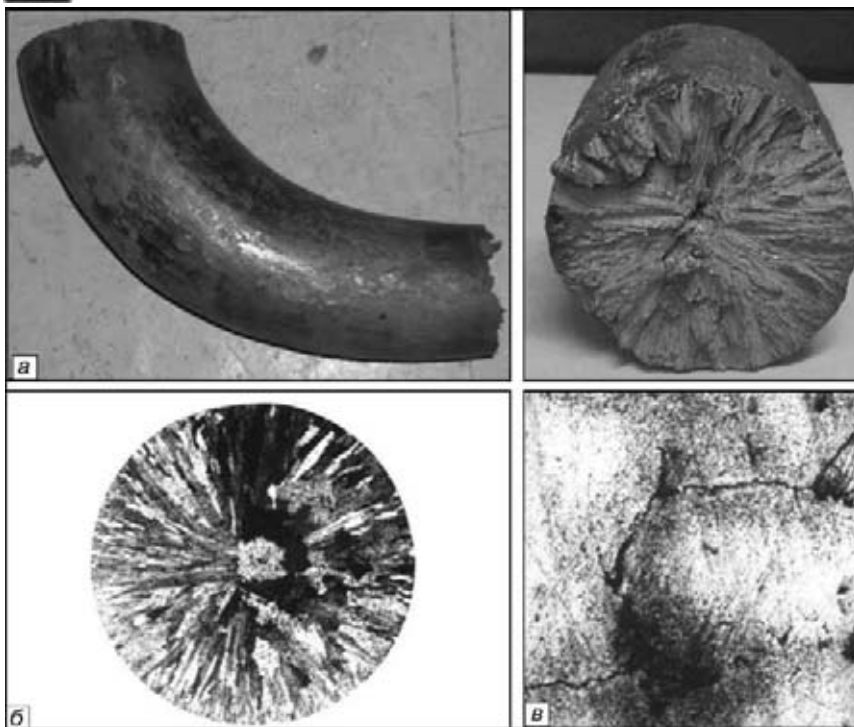


Рис. 1. Аварийный серийный сердечник: *a* — характер излома; *б* — макроструктура; *в* — микроструктура (X 200)

дущих мест занимают процессы, основанные на электрошлаковой плавке металла, в частности электрошлаковое кокильное литье (ЭКЛ) [4]. Это объясняется экономическими преимуществами, обусловленными более дешевым оборудованием, низкими эксплуатационными расходами и, главное, более высокими качественными показателями получаемого металла.

Традиционное электрошлаковое литье жаропрочных сплавов, осуществляемое способом переплава электрода в тигле с последующим переливом шлакометаллического расплава в форму, имеет ряд трудностей [5, 6], что обусловлено прежде всего вторичным окислением жидкого металла, вследствие которого в отливке не обеспечивается требуемый химический состав. Кроме того, литой электрошлаковый металл имеет столбчатую крупнозернистую структуру с большой протяженностью первичных осей дендритов. Все эти факторы не способствуют получению требуемых служебных характеристик литого металла. Поэтому совершенствование технологии электрошлаковых процессов является актуальной задачей.

Исследовали возможности совершенствования технологии ЭКЛ. Переплав электрода, в качестве которого использовали прокат сплава ЭП-202 диаметром 60 мм, начинали с жидкого старта и осуществляли под высокофторидным флюсом АНФ-21 на установке А-550У с источником питания ТШС-3000-1. Данная установка имеет небольшие габариты и удобна в эксплуатации, что способствовало ее широкому применению в исследовательских работах.

В качестве тигля использовали медную водоохлаждаемую плавильную емкость, гарантирующую «стерильные» условия плавки жаропрочных спла-

вов. Для повышения ее КПД на внутренней поверхности обечайки выполняли щелевые выемки, образующие вместе со шлаковым гарнисажем газовые полости, обуславливающие высокое термическое сопротивление стенки, что позволяет накапливать в ней необходимое количество жидкого металла.

В связи со значительным «вторичным» окислением легирующих элементов при разливке жаропрочных сплавов на воздухе применяли схему донного слива расплава без промежуточных емкостей в литейную форму, устанавливаемую по оси плавильной емкости под проплавляемой пробкой-затравкой. Для этого использовали сливное устройство, состоящее из медного водоохлаждаемого поддона со сквозным конусным отверстием, в котором размещали токоподводящую пробку-затравку из того же материала, что и расходный электрод. В центральной части пробки выполняли глухое отверстие для установки охлаждающего элемента.

После накопления требуемой массы расплава охлаждающий элемент выводили из пробки, перемика между отверстием и расплавом переставала охлаждаться и проплавлялась, в результате чего происходил слив расплава в форму со значительной прибыльной частью для принятия жидкого флюса, который, являясь тепловой надставкой, выравнивал температуру кристаллизующей отливки и предотвращал образование в ней усадочной полости.

Схема комплекса для ЭКЛ представлена на рис. 2.

Технология изготовления сердечника включает плавку электрода в плавильной емкости под флюсом, модифицирование накопленного металла и последующую его заливку вместе со шлаком в металлическую литейную форму (кокиль). Режим переплава следующий: напряжение 42 В, ток 2850... 3000 А.

В последнее время для повышения качества литого металла изделий из жаропрочных сплавов применяют модифицирование тугоплавкими частицами [7–10]. В данной работе для модифицирования использовали ультрадисперсные порошки карбонитрида титана (TiCN), титана и иттрия. Выбор модификатора осуществляли согласно методике, изложенной в работе [11]. Модификатор получали смешиванием порошковых компонентов с последующим холодным прессованием в таблетки диаметром 25... 30 мм и толщиной 10... 20 мм. Модификатор вводили при температуре 1650 °С за 2 мин до слива, что обеспечивало равномерное распределение дисперсных частиц-инокуляторов по всему объему жидкого металла в плавильной емкости. Заливку металла в металлическую литейную форму-кокиль проводили при температуре 1600 °С.

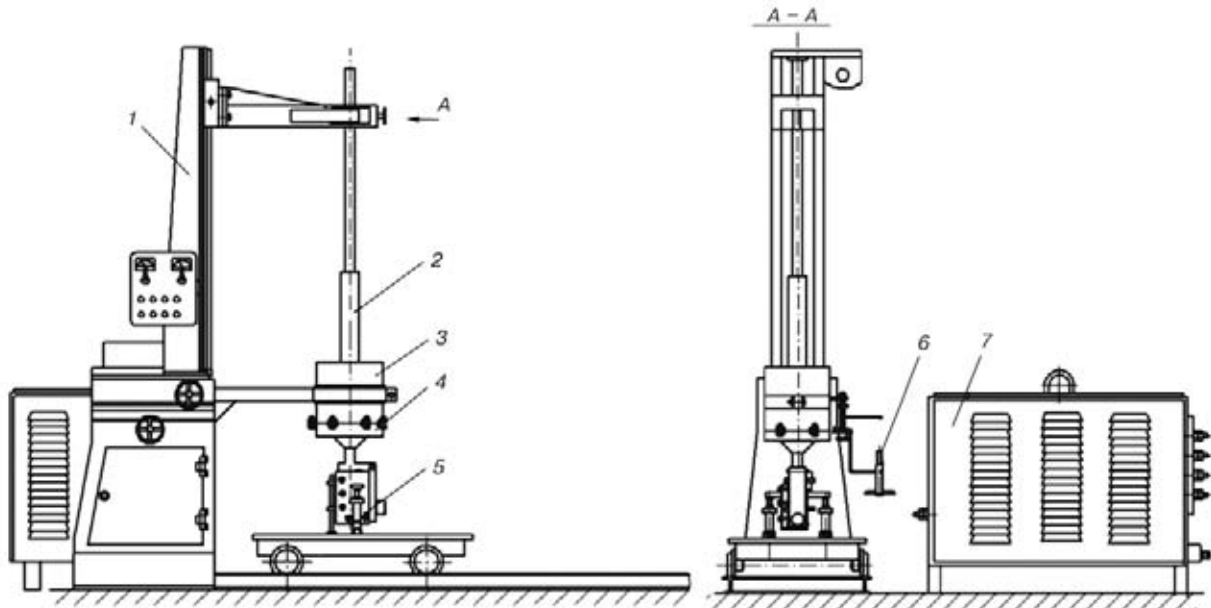


Рис. 2. Комплекс для ЭКЛ: 1 — установка А-550У; 2 — электрод; 3 — плавильная емкость; 4 — поддон; 5 — кокиль; 6 — охлаждающий элемент; 7 — трансформатор ТШС-3000

После заливки расплава литейную форму отсоединяли от плавильной емкости и переносили кранбалкой на площадку для окончательной кристаллизации отливки и остывания. Затем форму разбирали и извлекали литую заготовку. Наружная поверхность отливки была ровной, шлаковый гарнисаж составлял около 1 мм, что позволило получить небольшой припуск на дальнейшую механическую обработку. Разобранный кокиль с отливкой в гарнисаже и внешний вид изготавливаемых сердечников приведены на рис. 3.

Из полученных таким образом отливок изготавливали образцы для экспериментов и металлографических исследований. Сравнивали качество металла немодифицированного и с различной степенью модифицирования.

Сплав ЭП-202 относится к группе литейных сложнолегированных многокомпонентных жаропрочных сплавов, в которых наряду со значительным размером макрозерна и с большой разнородностью кристаллов при кристаллизации образуются различные фазы: твердые растворы, эвтектические системы, карбиды, интерметаллические соединения. Основной упрочняющей фазой является  $\gamma'$ -фаза, представляющая собой интерметаллид Ni (Al, Ti). Поэтому свойства литого сплава прежде всего определяются его химическим и фазовым составами.

Данные химического анализа (табл. 1) свидетельствуют о том, что металл отливки, полученной способом донного слива, по большинству основных легирующих элементов изменяется незначительно и укладывается в марочный. Ожидаемого увеличения массовой доли углерода после введения порции модификатора практически не зафиксировано. Это можно объяснить тем, что содержание свободного и связанного углерода в ультрадисперсных порошках TiCN не превышает 1,2 и 12,0 %

массы порошка. Поэтому введение 0,06 % TiCN может увеличить содержание углерода на тысячные доли процента, что выходит за пределы требований технических условий.

Механические свойства металла при комнатной температуре и длительную прочность при 850 °С определяли на образцах, вырезанных в продольном направлении и прошедших термическую обработку: закалка 1170 °С, 3 ч, охлаждение на воздухе; старение при 850 °С, выдержка 10 ч, охлаждение на воздухе. Полученные результаты, представленные в табл. 2, свидетельствуют о том, что модифицирование существенно повышает как механические свойства сплава, так и его длительную прочность.

Наилучшие результаты зафиксированы при общей добавке модификатора около 0,5 % массы жидкого металла. В этом случае в результате модифицирования при повышении прочности литого металла на 16 % жаропрочность  $\sigma_{200}^{850}$  увеличивается в 3,4 раза, что даже выше свойств исходного сплава. Это можно объяснить тем, что качество и служебные свойства жаропрочных сплавов, кроме химического состава, определяют состояние границ зерен, их размер, степень однородности, морфологию и топографию включений [3, 12, 13].

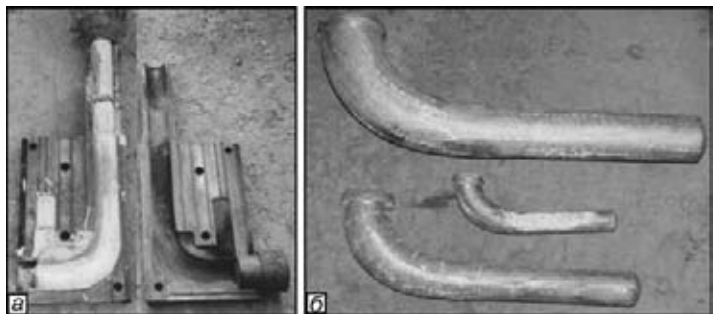


Рис. 3. Разобранный кокиль с отливкой (а) и внешний вид литых сердечников (б)

**Таблица 1. Химический состав сплава ХН67ВМТЮ**

Объект исследований	Массовая доля элементов, %									
	C	Cr	W	Mo	Ti	Al	Si	S	P	Mn
Исходный сплав	0,07	19,38	4,62	4,56	2,74	1,36	0,48	0,006	0,009	0,43
Металл без модифицирования	0,07	18,92	4,46	4,43	2,42	1,24	0,46	0,003	0,007	0,42
Металл, модифицированный 0,5 % (TiCN + Ti + Y)	0,07	18,97	4,46	4,44	2,65	1,25	0,46	0,003	0,007	0,42
Стандартный сплав	≤ 0,08	17...20	4...5	4...5	2,2...2,8	1,0...1,5	≤ 0,6	≤ 0,01	≤ 0,015	≤ 0,5

**Таблица 2. Результаты испытаний сплава ХН67ВМТЮ**

Объект исследований	Температура испытаний °С	Механические свойства				Жаропрочность $\tau_{200}^{550}$ , Ч
		$\sigma_b$	$\sigma_T$	$\delta$	$\psi$	
		МПа		%		
Исходный сплав	20	858	560	14,8	16,6	–
	850	526	–	12,7	–	81
Металл без модифицирования	20	784	478	8,6	12,1	–
	850	591	–	10,2	–	28
Металл, модифицированный 0,5 % (TiCN+Ti+Y)	20	914	616	20,2	21,6	–
	850	628	–	14,8	–	96

Изучение литого немодифицированного электрошлакового металла (рис. 4) показало, что макроструктура у него — транскристаллическая, состоящая из длинных узких столбчатых кристаллов по периферии и равноосных в центре. Объясняется это интенсивным отводом тепла металлургическим кокилом.

Протяженность столбчатых зерен достигает 30 мм, диаметр зерен в центре — 10 мм. Микроструктура представляет собой аустенит с выделением карбидов, эвтектики и  $\gamma'$ -фазы. Обнаружена ликвация, связанная с образованием участков карбонит-

ридов (Ti, Mo, W)(CN) и двойных карбидов типа (Ni, Cr)<sub>3</sub>(Mo, W)<sub>3</sub>C. В структуре зафиксированы иглообразные строчечно-сеточные включения карбидов большой протяженности, располагающиеся преимущественно по границам зерен.

Изучение структурных превращений при 850 °С показало, что упрочняющая  $\gamma'$ -фаза Ni<sub>3</sub>(Ti, Al) имеет округлые формы чаще неправильной конфигурации, расположенные хаотично. Размер частиц нестабилен — от 0,3 до 1,2 мкм. Это свидетельствует о ее коагуляции и растворении в  $\gamma$ -твердом растворе.

Кроме того, зафиксированы выделения пластинок  $\eta$ -фазы типа Ni<sub>3</sub>Ti, свидетельствующие о начале перерождения  $\gamma'$ -фазы в  $\eta$ -фазу. Процесс перерождения протекает по общей схеме: растворение частиц  $\gamma'$ -фазы и диффузии атомов титана к растущей пластинке  $\eta$ -фазы. Игольчатая форма фаз способствует хрупкому разрушению сплава [3, 13]. Кроме того, извлекая тугоплавкие элементы из твердого раствора, эти фазы ослабляют его.

Введение в расплав 0,5 % модификатора

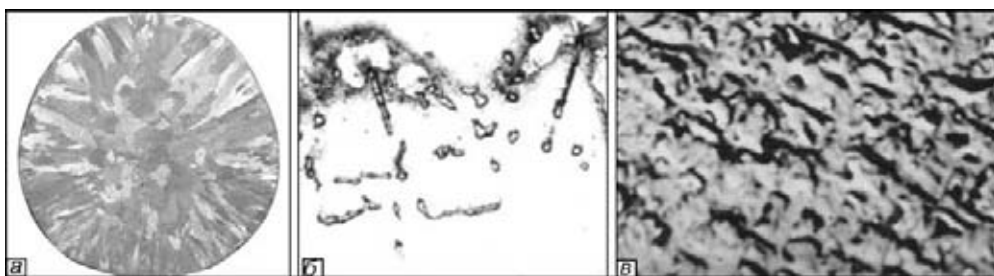


Рис. 4. Структура сердечника из немодифицированного сплава ХН67ВМТЮ: *a* — макроструктура; *б* — микроструктура (× 240); *в* —  $\gamma'$ -фаза (× 8000)

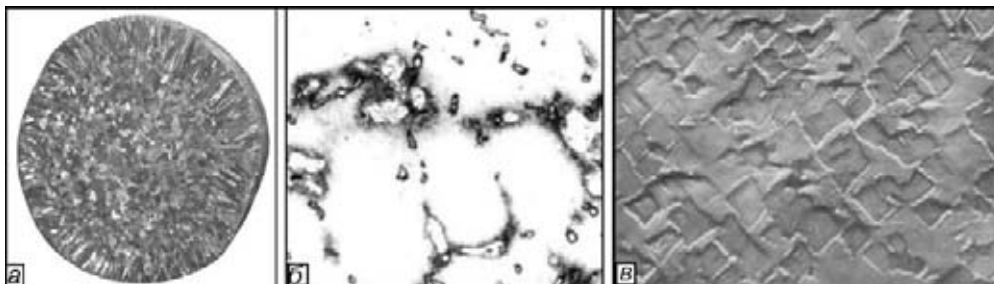


Рис. 5. Структура сердечника из модифицированного сплава ХН67ВМТЮ: *a* — макроструктура; *б* — микроструктура (× 240); *в* —  $\gamma'$ -фаза (× 10000)



приводит к существенному изменению как полученной структуры, так и морфологии и топографии выделяющихся фаз. Происходит резкое измельчение макрозерна, столбчатость зерен и разноточность практически устраняются (рис. 5).

Модификатор положительно влияет на морфологию карбидов, придавая выделениям дискретный характер. Карбиды приобретают компактную равноосную форму. Граница зерна имеет вид извилистой линии, огибающей частицы, расположенные в матрице сплава. Дендритная структура литого металла тонкая и однородная по сечению слитка. Имеются существенные изменения в строении  $\gamma'$ -фазы. Она приобретает прямолинейные очертания, близкие к кубической форме и упорядоченное расположение. Такое состояние структуры свидетельствует о том, что границы зерен «закреплены» частицами и поэтому их миграция при нагреве незначительна, а, следовательно, уровень свойств при высоких температурах должен быть увеличенным. Действительно, испытания показали, что механические свойства, длительная прочность модифицированного металла высокие, однородны по длине сердечника и превосходят свойства серийного сплава металлургического комбината.

По разработанной технологии ЭКЛ на ЗАО «Омский завод специальных изделий» организовано производство сплошных роговых сердечников по ГОСТ 17375-83. Производственные испытания показали существенное удлинение срока службы сердечника в составе протяжки, что позволяет изготавливать свыше 30000 отводов.

1. Гальперин А. И. Машины и оборудование для изготовления криволинейных участков трубопроводов. — М.: Недра, 1983. — 203 с.
2. Шувалов Ю. Б. Горячая протяжка крутоизогнутых отводов на полых роогообразных сердечниках // Хим. и нефт. машиностроение. — 1991. — № 2. — С. 36-37.

3. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. — М.: Металлургия, 1969. — 752 с.
4. Патон Б. Е., Медовар Б. И. Электрошлаковая тигельная плавка и разливка металла. — Киев: Наук. думка, 1988. — 214 с.
5. Башин Ю. А., Исакина В. Н., Масленкова Е. А. Влияние переплавных процессов на структуру и свойства стали. — М.: Металлургия, 1991. — 240 с.
6. Электрошлаковая плавка жаропрочного никелевого сплава ХН73МБТЮ / М. И. Кличевец, А. В. Шелгаева, Г. Г. Ведерников и др. // Спец. электрометаллургия. — 1980. — Вып. 41. — С. 60-68.
7. Влияние добавок нитрида циркония на структуру и свойства сплава ЖС6К / Ю. З. Бабаскин, Л. Н. Лариков, С. Я. Шнищин, О. А. Шматко // Жаропрочные и жаростойкие сплавы на никелевой основе. — М.: Наука, 1984. — С. 184-187.
8. Объемное модифицирование никелевых сплавов при изготовлении отливок / В. Н. Чеченцев, В. П. Сабуров, Е. В. Замешаев, А. М. Микитасъ // Литейн. пр-во. — 1988. — № 9. — С. 13-14.
9. Влияние микролегирования сплава ЖС6У иттрием на его фазовую стабильность / В. В. Сидоров, Г. И. Морозова, А. М. Кулебякина, А. И. Гневшена // Металловед. и терм. обраб. металлов. — 1988. — № 12. — С. 21-23.
10. Фаткулин О. Х., Офицеров А. А. Модифицирование жаропрочных никелевых сплавов дисперсными частицами тугоплавких соединений // Литейн. пр-во. — 1993. — № 4. — С. 13-14.
11. Еремин Е. Н. Закономерности комплексного модифицирования литого электрошлакового металла // Анализ и синтез механических систем. — Омск: ОмГТУ, 1999. — С. 76-78.
12. Структура, фазовый состав и свойства сплава ЭИ437Б электрошлаковой разливки / Ю. В. Латаш, М. М. Ключев, Г. П. Негода и др. // Спец. электрометаллургия. — 1984. — Вып. 55. — С. 7-11.
13. Прогнозирование влияния структурных факторов на механические свойства жаропрочных сплавов / А. В. Логунов, П. В. Петрушин, Е. А. Кукшова, Ю. М. Должанский // Металловед. и терм. обраб. металлов. — 1987. — № 6. — С. 16-20.

Омск. гос. техн. ун-т

ЗАО «Омский завод специальных изделий»

Поступила 08.02.2005

## ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ Объявляет ежегодный набор по следующим специальностям:

### ДОКТОРАНТУРА

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

### АСПИРАНТУРА

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

Прием документов проводится в сентябре.

Контактный телефон: 289-84-11.

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

Документы направлять по адресу: 03680, Украина, Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 11,

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ученому секретарю



УДК 669.187.526:51.001.57

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТИТАНОВЫХ СЛИТКОВ-СЛЯБОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ СПОСОБОМ ЭЛПЕ

Г. В. Жук, В. А. Березос, Н. П. Тригуб

Приведены данные математических расчетов параметров кристаллизации: градиентов температуры, скоростей охлаждения расплава для слитков-слябов титанового сплава Ti-6Al-4V ЭЛПЕ. На основе скоростей охлаждения получены карты кристаллизации слитков. Показано совпадение прогнозированной и реальной структур слитков-слябов.

Data of mathematical calculations of parameters of crystallization are given: gradients of temperature, rates of melt cooling for ingots-slabs of titanium alloy Ti-6Al-4V of EBCHM. Charts of ingots crystallization are obtained on the basis of cooling rates. The correlation of predicted structure with structure of real ingots-slabs is shown.

**Ключевые слова:** слиток-сляб; электронно-лучевая плавка; математическое моделирование; скорости охлаждения; сплавы титана; структура слитка

Одной из основных тенденций развития современной металлургии является получение структуры и свойств металла слитка, максимально благоприятствующих его дальнейшей деформации и механической обработке. Особые требования предъявляются к слиткам легированных сплавов (жаропрочных, жаро- и коррозионно-стойких и т. п.). Проблемы, возникающими при выплавке таких слитков, являются измельчение структуры, преодоление структурной и химической макро- и микронеоднородности.

Структурообразование слитка определяется в основном марочным составом сплава, теплофизическими условиями его кристаллизации, а также содержанием в нем примесей. Теплофизические условия формирования слитка в кристаллизаторе имеют решающее влияние на его структуру.

Большие возможности по регулированию нагрева поверхности слитка металла в кристаллизаторе обеспечивает электронно-лучевая плавка с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) благодаря применению независимого источника нагрева — электронного луча. Наличие промежуточной емкости дает возможность подавать металл в кристаллизатор необходимыми порциями с заданной частотой. ЭЛПЕ позволяет обеспечить разделение процессов плавки и кристаллизации и, таким образом, в широких пределах изменять условия нагрева металла в кристаллизаторе при неизменной технологической производи-

тельности плавки. Вместе с тем процессы структурообразования слитка при ЭЛПЕ изучены недостаточно.

Традиционный подход к прогнозированию структуры слитков, получаемых в полунепрерывных процессах специальной электрометаллургии, заключается в определении градиентов температуры  $G$  (К/см) и скоростей кристаллизации  $v_{кр}$  (см/с) металла на фронте кристаллизации (границе жидкой ванны) [1, 2]. С нашей точки зрения, данный подход не всегда оправдан, особенно в случае значительных (более 1 К/с) скоростей охлаждения расплава, поскольку градиент температуры является характеристикой условий нагрева и охлаждения жидкого металла. Например, заливка в кристаллизатор более перегретого металла увеличивает градиент температуры в ванне жидкого металла и должна привести к измельчению структуры слитка. На практике же происходит обратное [3].

Скорость кристаллизации является вторичной характеристикой, поскольку характеризует уже происходящий процесс кристаллизации, а не предполагаемый. Наиболее значимой, на наш взгляд, характеристикой кристаллизации слитка является скорость охлаждения расплава  $v_{охл}$  (К/с) перед началом его затвердевания, которая является углом наклона кривой охлаждения. Она определяет степень достигаемого переохлаждения расплава и напрямую влияет на структуру слитка [4, 5]. Препятствием в использовании скорости охлаждения расплава для прогнозирования структуры слитка является сложность ее экспериментального определения.





Рис. 1. Слитки-слябы (150×500×2000 мм) титанового сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V), полученные способом ЭЛПЕ

Большие возможности для расчетного определения  $v_{\text{охл}}$  заложены в методах математического моделирования теплофизических процессов, происходящих при формировании слитка. Решение уравнения теплопроводности методом конечных разностей позволяет определить температурное поле слитка в любой момент времени. Исходя из эволюционирующего температурного поля в каждой точке путем соотношения разности температур с отрезками времени и расстоянием могут быть определены такие теплофизические параметры процесса формирования слитка, как  $G$  и  $v_{\text{охл}}$ .

Авторы выполнили расчеты поля температур в слитках-слябах титанового сплава Ti-6Al-4V (рис. 1) с применением математической модели процессов переноса тепла в слитках ЭЛПЕ [6], адаптированной для трехмерного случая.

Моделировали процесс ЭЛПЕ сплава Ti-6Al-4V в медный водоохлаждаемый кристаллизатор (рис. 2) и формирование в нем слитка сечением 150 × 500 мм. При этом жидкий металл, перегретый над температурой ликвидус на 50 К, сливали из промежуточной емкости в кристаллизатор с периодичностью 100 с. Производительность плавки составляла 200 кг/ч. В процессе многочисленных экспериментов варьировали режимы электронно-лучевого нагрева слитка в кристаллизаторе (при режиме 1 слиток обогревался электронным лучом мощностью 60 кВт при однородном распределении плотности энергии по торцу слитка; при режиме 2 нагрев лучом мощностью 50 кВт сосредотачивался по периферии слитка на расстоянии 0...30 мм от края кристаллизатора, остальная часть торца слитка равномерно нагревалась лучом мощностью 10 кВт; при режиме 3 на периферии слитка мощность луча составляла 35, на остальной части — 10 кВт).

Необходимо отметить, что моделируемые режимы 2 и 3 соответствуют реальным режимам электронно-лучевого нагрева периферийной части поверхности слитка в кристаллизаторе концентрированным электронным лучом. При этом нагрев лучом мощностью 10 кВт моделирует так называемый хвост луча, т. е. рассеянные электроны, неизбежно



Рис. 2. Процесс выплавки слитка-сляба

присутствующие при электронно-лучевом нагреве. Расчеты проводили до достижения слитком высоты более 150 мм (т. е. ширины наименьшей грани слитка), при которой плавка переходит в установившийся квазистационарный режим.

Результаты расчета температурных полей слитка приведены на рис. 3. При плавке по режиму 1 в головной части слитка зафиксирована относительно

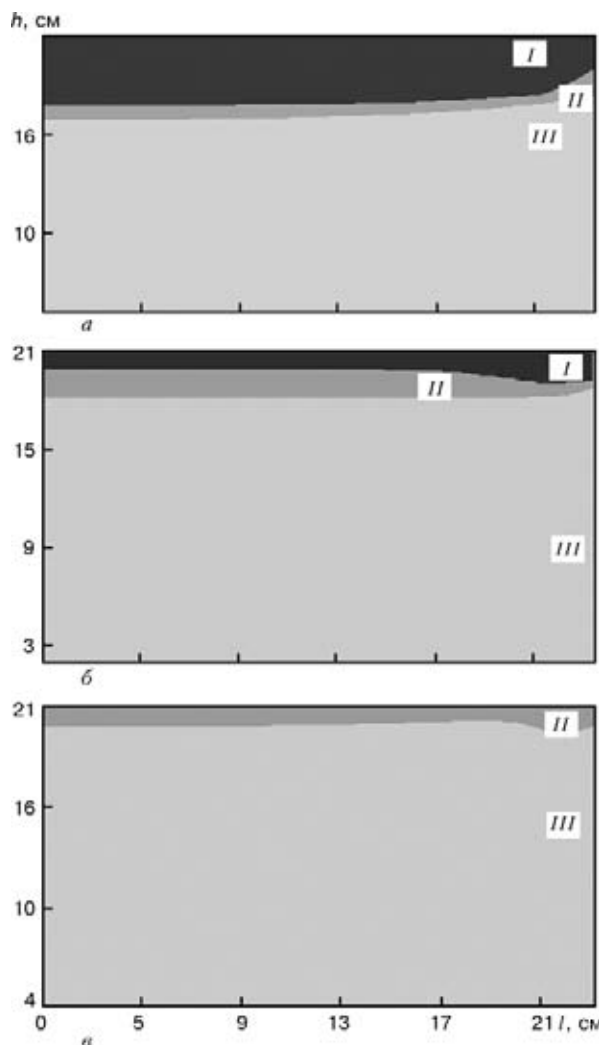


Рис. 3. Поля температур сляба (150×500 мм) сплава Ti-6Al-4V (продольное сечение): I — жидкая ванна (>1898 К); II — твердо-жидкая область (1868... 1898 К); III — затвердевающий металл (<1868 К); здесь и на рис. 4-7 а — режим 1; б — режим 2; в — режим 3; h — высота слитка; l — расстояние от оси

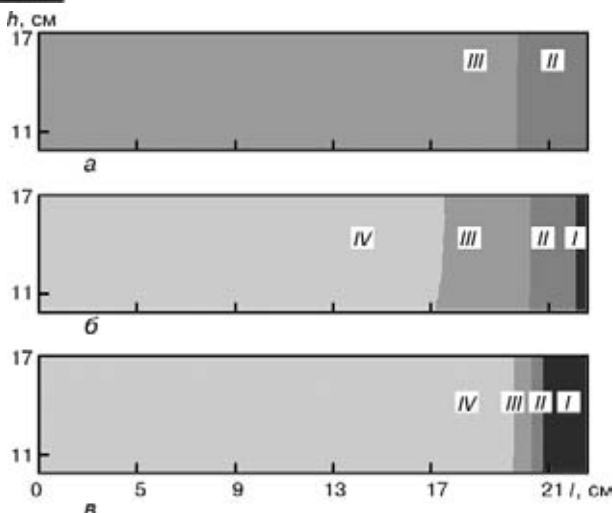


Рис. 4. Карта градиентов температур в слябе: I — >60; II — 50...60; III — 40...50; IV — 30...40 К/см

глубокая жидкая ванна (до 50 мм). Плавка по режиму 2 характеризуется относительно мелкой ванной жидкого металла (около 20 мм) с незначительным перегревом в периферийной части слитка, по режиму 3 — твердожидким состоянием металла по всей поверхности слитка в кристаллизаторе.

На основании данных эволюционирующего во времени температурного поля в слитке выполнены расчеты градиентов температур, скоростей охлаждения и кристаллизации расплава в каждой точке слитка в момент прохождения этой точки интервала солидус-ликвидус, т. е. в момент затвердевания металла (рис. 4, 5).

Анализ полученных данных позволяет установить зависимость значений обеих теплофизических характеристик от режимов 1–3 электронно-лучевого нагрева слитка-сляба. С понижением мощности электронно-лучевого нагрева и переводом его максимума в периферийную часть слитка указанные значения возрастают. Вместе с тем карта скоростей охлаждения наиболее точно отражает условия кристаллизации слитка. Так, для режима 2 на ней четко виден минимум скорости охлаждения в периферийной части слитка. При этом на карте градиента тем-

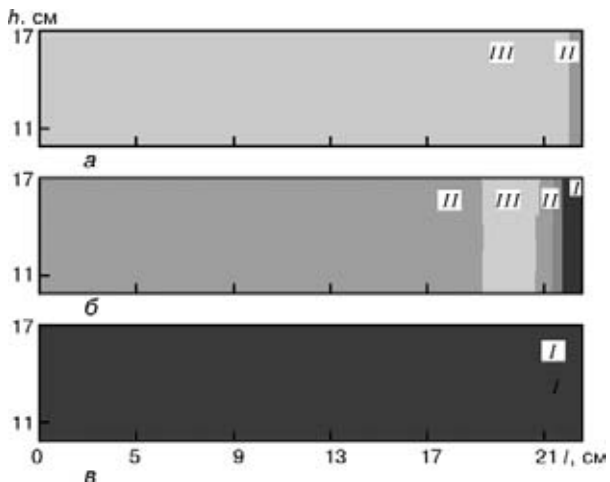


Рис. 5. Карта скоростей охлаждения в слябе: I — >3; II — 2...3; III — 1...2; IV — 0...1 К/с

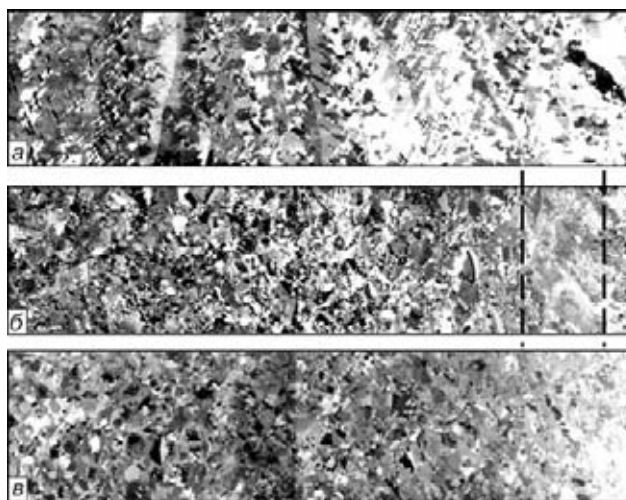


Рис. 6. Макроструктура слябов титанового сплава Ti-6Al-4V (полуширина, продольное сечение), выплавленных при различных режимах электронно-лучевого нагрева

ператур при движении от оси слитка к его периферии для квазистационарного процесса выплавки слитка экстремум значений не обнаружен.

Для проверки адекватности расчетных данных в ИЭС им. Е. О. Патона проведены экспериментальные плавки слябов сечением 150 × 500 мм и длиной до 200 мм из титанового сплава Ti-6Al-4V [7]. Исследование продольных темплетов слябов Ti-6Al-4V ЭЛПЕ, выплавленных по режимам 1–3 (рис. 6), подтвердило справедливость изложенного выше. Относительно низким (до 1 К/с) скоростям охлаждения (рис. 5, а) соответствует структура слитков, состоящая из столбчатых кристаллитов (рис. 6, а), а при скоростях охлаждения более 1 К/с (рис. 5, б) образуется равноосная структура металла сляба (рис. 6, в). Особенно показательным является эффект, достигнутый при режиме электронно-лучевого нагрева 2. Область минимальных скоростей охлаждения, представленная на карте (рис. 5, б), соответствует локальной области столбчатых кристаллитов в слитке-слябе (рис. 6, б). Таким образом, если принять скорость охлаждения 1 К/с как переход от столбчатой структуры к равноосной, то карты кристаллизации, построенные в данном предположении (рис. 7), полностью соответствуют реальной структуре слитков.

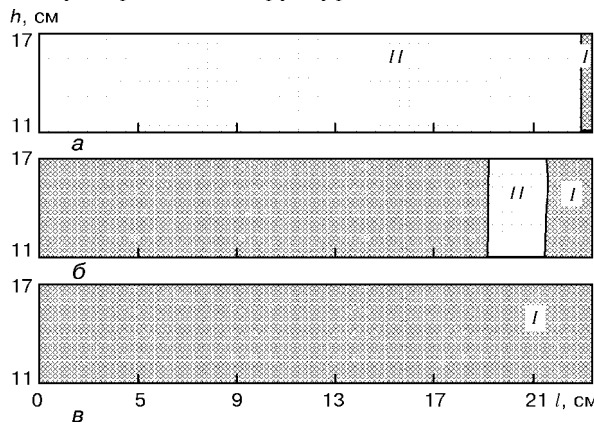


Рис. 7. Прогнозируемая структура слябов: I — равноосная; II — столбчатая



## Выводы

1. Установлено, что скорость охлаждения, достигаемая путем металлического расплава перед началом кристаллизации, оказывает решающее влияние на структуру слитков ЭЛПЕ.

2. Показано, что с помощью карты скоростей охлаждения, построенной с использованием математической модели переноса тепла в слитке ЭЛПЕ, можно прогнозировать структуру слитков-слябов титановых сплавов.

1. *Ефимов В. А.* Разливка и кристаллизация стали. — М.: Металлургия, 1976. — 552 с.
2. *Kobryn P. A., Semiatin S. L.* Microstructure and texture evolution during solidification processing of Ti-6Al-4V // J. of materials proc. technology. — 2003. — № 135. — P. 330-339.

3. *Чалмерс Б.* Теория затвердевания / Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1968. — 288 с.
4. *Мирошниченко И. С.* Закалка из жидкого состояния. — М.: Металлургия, 1982. — 168 с.
5. *Жук Г. В., Тригуб Н. П., Калинюк А. Н.* Влияние скорости охлаждения на структуру цилиндрических слитков ЭЛПЕ титанового сплава Ti-6Al-4V // Процессы литья. — 2003. — № 4. — С. 79-82.
6. *Жук Г. В., Ахонина Л. В., Тригуб Н. П.* Математическое моделирование процессов кристаллизации титанового сплава Ti-6Al-4V при ЭЛПЕ // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1998. — № 2. — С. 21-25.
7. *Жук Г. В., Калинюк А. Н., Тригуб Н. П.* Производство титановых слитков-слябов методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью // Соврем. электрометаллургия. — 2004. — № 3. — С. 22-24.

Ин-т электросварки НАН Украины, Киев

Поступила 07.06.2005

## Слияние усиливает мировые рыночные позиции концерна «Siemens» в развивающихся отраслях экономики

Европейская комиссия одобрила предложение «Siemens» о приобретении австрийской компании «VA Technologie AG» («VA Tech»). О решении было объявлено 13 июля 2004 года в Брюсселе. После завершения сделки «Siemens» становится держателем 97,15 % акций компании «VA Tech».

«VA Technologie AG» — австрийская инжиниринговая компания — является одним из мировых лидеров в области инжиниринга и производства оборудования для металлургической, сталелитейной и алюминиевой промышленности. Помимо этого, компания занимает сильные позиции на рынке оборудования для передачи и распределения энергии (распределительная и коммутационная техника, силовые трансформаторы), а также имеет опыт в разработке комплексных инфраструктурных решений для промышленности, инженерных сетей зданий и сооружений, коммунального хозяйства. Компания внедряет проекты в различных странах мира. Объем продаж в 2004 году составил 4,1 млрд евро. Количество сотрудников — 16,5 тысяч человек.

«Siemens» полностью интегрирует металлургический бизнес «VA Technologie AG» — группу «Voest Alpine Industrieanlagenbau» (VAI) — в свой департамент «Комплексные решения и услуги для промышленности». Объединенная компания «Siemens и VAI» станет одним из ведущих мировых поставщиков технологий, решений и услуг для заводов по производству чугуна, стали и алюминия, а также позволит укрепить свои позиции как одной из ведущих в этом секторе международных компаний и обеспечить крепкий фундамент для дальнейшего развития.

В целом, слияние компаний позволит создать крупнейшего поставщика электротехнического оборудования, систем и услуг в промышленном, строительном и коммунальном секторах, включая ИТ-услуги, будет способствовать более интенсивному развитию деятельности концерна «Siemens» в Центральной и Юго-Восточной Европе.

На украинском рынке металлургическое подразделение компании «VA Tech» — группа «Voest Alpine Industrieanlagenbau» (VAI) — занимает прочные позиции ведущего поставщика оборудования и решений для одного из важнейших секторов украинской экономики — горно-металлургической промышленности. В настоящее время консорциум ИСД совместно с VAI реализует едва ли не самый крупный инвестиционный проект в Украине по реконструкции Алчевского металлургического комбината (АМК, Луганская область). Общая стоимость программы реконструкции составляет 1,4 млрд евро. После ее реализации объемы производства увеличатся вдвое. Группа VAI принимает активное участие в модернизации таких металлургических гигантов Украины, как Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича, комбинат Азовсталь, Днепропетровский металлургический комбинат им. Дзержинского.

«Мы чрезвычайно удовлетворены решением Центрального правления концерна усилить инжиниринговый бизнес «Siemens» за счет приобретения компании «VA Tech». Это важно для регионального подразделения «Siemens» в Украине, поскольку инфраструктурные преобразования в промышленности, в частности в металлургии, сейчас как никогда актуальны и имеют большие перспективы. Мы надеемся, что после объединения двух наших компаний, имеющих большой опыт работы на рынке Украины, мы сможем предоставлять нашим заказчикам еще более эффективные инновационные продукты и решения, а объединенная команда наших специалистов сможет укрепить и расширить круг наших украинских партнеров и клиентов», — так прокомментировал приобретение австрийской инжиниринговой компании Мартин Грунерт, генеральный директор дочернего предприятия «Сименс Украина».

*«Сименс» в Украине представлен широким спектром своих продуктов и решений, особенно в области телекоммуникаций и медицинского оборудования, а также транспортных систем, средств автоматизации производства и энергетического оборудования. В 2004 финансовом году объем продаж всех консолидированных подразделений «Сименс» в Украине составил 217 млн евро, а портфель заказов достиг 291 млн евро.*

УДК 669.187.526.001.5

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИСПАРЕНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ ОПЛАВЛЕНИИ ПОВЕРХНОСТИ СЛИТКОВ-СЛЯБОВ ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА

С. В. Ахонин, А. С. Миленин, А. Н. Пикулин

Разработана математическая модель испарения легирующих элементов при электронно-лучевом оплавлении слитков-слябов из сплавов на основе титана. В рамках предложенной модели получены зависимости химического состава оплавленного слоя слитка от технологических параметров процесса. Адекватность модели подтверждена экспериментальными данными, полученными в результате оплавления поверхности слитков-слябов сплава Ti-6Al-4V.

Mathematical model of evaporation of alloying elements in electron beam surface melting of ingots-slabs from titanium-base alloys has been developed. Dependencies of chemical composition of melted layer of ingot on technological parameters of the process were obtained in the scope of this offered model. Adequacy of model was confirmed by experimental data obtained as a result of surface melting of Ti-6Al-4V alloy ingots-slabs.

**Ключевые слова:** электронно-лучевое оплавление; слиток-сляб; оплавляемый поверхностный слой; химический состав; испарение

**Введение.** В силу различных причин на поверхности слитков, полученных путем электронно-лучевого или вакуумно-дугового переплава, образуются дефекты, отрицательно влияющие на свойства металла. Одним из способов удаления поверхностных дефектов является электронно-лучевое оплавление (ЭЛО) поверхности слитков [1].

Отличительной особенностью этого процесса является то, что он проходит в вакууме, поэтому различная упругость паров легирующих элементов сплавов может привести к изменению химического состава поверхностного слоя. Таким образом, важным аспектом оптимизации процесса ЭЛО является обеспечение соответствия состава оплавленного слоя установленным стандартам.

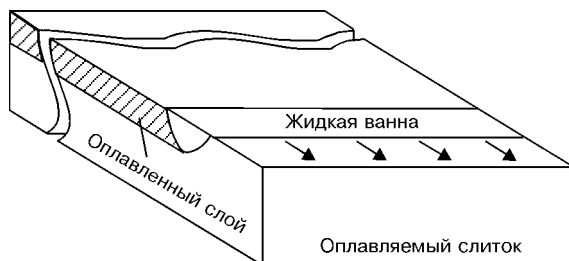


Рис. 1. Технологическая схема электронно-лучевого оплавления

Данную задачу решали методом математического моделирования на примере процесса ЭЛО слитков-слябов титанового сплава Ti-6Al-4V. Предложенная модель позволяет получить зависимости химического состава оплавленного слоя от различных технологических параметров процесса ЭЛО.

**Технология ЭЛО поверхности слитков-слябов.** Сущность технологии ЭЛО поверхности слитков-слябов заключается в расплавлении поверхностного слоя электронными лучами на глубину, достаточную для удаления всех дефектов. Путём сканирования электронного луча на поверхности слитка создают линейный источник тепла на всю ширину слитка-сляба, вследствие чего на оплавляемой поверхности формируется узкая ванна жидкого металла (рис. 1). Посредством перемещения источника вдоль слитка производят оплавление всей поверхности.

Эта схема процесса ЭЛО реализована на базе специализированной электронно-лучевой установки УЭ-185 в производственном цехе электронно-лучевой плавки ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины [2].

**Моделирование процессов испарения легирующих элементов сплава из оплавляемого слоя при ЭЛО поверхности слитка-сляба.** В основе математического моделирования испарения, происходящего при оплавлении поверхности слитка, лежат уравнения материального баланса, отражающие процессы массообмена через фазовые поверхности, ограничивающие область расплавленного металла (жидкую ванну).

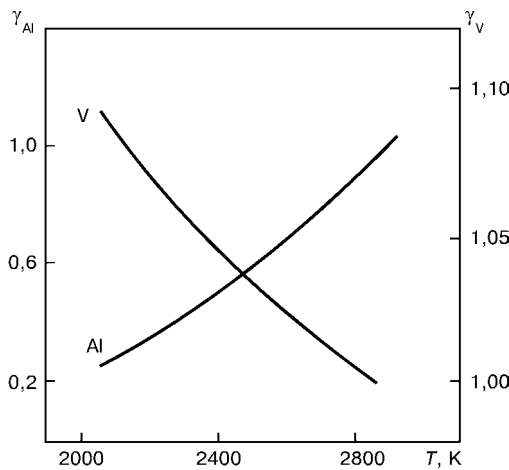


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициентов активности алюминия и ванадия в жидкой фазе сплава Ti-6Al-4V

Так, в рассматриваемом случае в жидкую ванну поступает плавящийся металл первоначального состава, в то время как из неё уходит кристаллизующийся металл конечного состава. Кроме того, с поверхности жидкой ванны происходит испарение металла. В предположении, что концентрации элементов сплава в жидкой ванне равны их конечной концентрации в оплавленном слое слитка, уравнения материального баланса для каждого элемента при ЭЛО поверхности слитка-сляба из сплава Ti-6Al-4V принимают вид

$$\begin{cases} \frac{d(\rho V_B [Ti]_l)}{dt} = m[Ti]_0 - S\pi_{Ti} - m_1[Ti]_1; \\ \frac{d(\rho V_B [Al]_l)}{dt} = m[Al]_0 - S\pi_{Al} - m_1[Al]_1; \\ \frac{d(\rho V_B [V]_l)}{dt} = m[V]_0 - S\pi_V - m_1[V]_1, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность сплава, кг/м<sup>3</sup>;  $V_B$  — объём ванны жидкого металла, м<sup>3</sup>;  $m$  — скорость поступления металла в жидкую ванну, кг/с;  $m_1$  — скорость перехода металла из жидкого состояния в твёрдое, кг/с;  $S$  — площадь фазовой поверхности жидкая фаза-газовая фаза, м<sup>2</sup>;  $[Ti]_0$ ,  $[Al]_0$ ,  $[V]_0$  — начальные массовые концентрации соответственно титана, алюминия и ванадия;  $[Ti]_1$ ,  $[Al]_1$ ,  $[V]_1$  — конечные массовые концентрации в оплавленном слое соответственно титана, алюминия и ванадия;  $\pi_{Ti}$ ,  $\pi_{Al}$ ,  $\pi_V$  — удельные скорости испарения соответствующих элементов с поверхности расплава, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Поскольку большую часть времени процесс ЭЛО происходит в режиме, приближенном к стационарному, то это означает равенство нулю производных по времени в выражении (1):

$$\frac{d(\rho V_B [Ti]_l)}{dt} = \frac{d(\rho V_B [Al]_l)}{dt} = \frac{d(\rho V_B [V]_l)}{dt} = 0.$$

Скорость поступления металла в жидкую ванну вычисляется из следующего соотношения:

$$m = hb\rho v,$$

где  $h$  — глубина проплавления, м;  $b$  — ширина слитка, м;  $v$  — скорость перемещения фокального пятна по поверхности расплава, м/с.

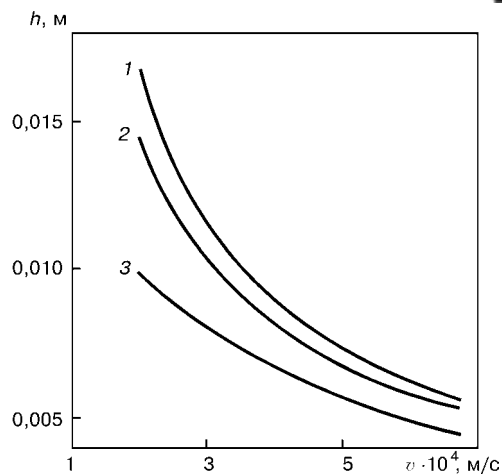


Рис. 3. Зависимость глубины проплавления  $h$  от скорости движения  $v$  фокального пятна электронного луча по поверхности слитка при различных значениях мощности электронно-лучевой пушки, Вт: 1 — 153850; 2 — 125500; 3 — 100000

Удельная скорость испарения каждого из элементов сплава с поверхности жидкой ванны вычисляется согласно уравнению Ленгмюра [3]:

$$\pi_i = k_i X_i, \quad (2)$$

где  $k_i = \gamma_i p_i^0 \frac{\sqrt{M_i}}{2\pi R T}$  — константа скорости испарения;  $\gamma_i$  — коэффициент активности  $i$ -го элемента (алюминия, ванадия, титана) в растворе;  $p_i^0$  — равновесное давление паров соответствующего элемента, Па;  $M_i$  — молярная масса элемента, кг/моль;  $X_i$  — мольная доля элемента у поверхности жидкой ванны;  $R = 8,314$  Дж/(моль·К) — универсальная газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура жидкого металла, К.

Для титана, алюминия и ванадия зависимости равновесного давления паров от температуры следующие [4]:

$$\begin{cases} \log(p_{Ti}^0(T)) = -\frac{22946}{T} + 10,581 - 0,373 \log(T); \\ \log(p_{Al}^0(T)) = -\frac{16379}{T} + 9,979 - 0,335 \log(T); \\ \log(p_V^0(T)) = -\frac{24378}{T} + 10,762 - 0,325 \log(T). \end{cases}$$

В общем случае коэффициенты активности  $\gamma_i$  являются функциями температуры расплава и его состава. Соответствующие температурные зависимости вычисляли в рамках модели Редлиха-Кистера для тройной системы Ti-Al-V с учётом мольных концентраций соответствующих элементов в рассматриваемом сплаве [5]. Как видно из рис. 2, коэффициенты активности алюминия и ванадия при повышении температуры жидкого металла ведут себя по-разному. Коэффициент активности алюминия монотонно растёт, изменяясь в диапазоне значений от 0,2 и выше, тогда как коэффициент активности ванадия убывает, принимая значения, близкие к 1. Коэффициент активности титана как основного элемента раствора принят равным 1 [6].



Концентрация элементов на поверхности жидкой ванны определяется как исходным составом сплава, так и процессами массопереноса в жидкой фазе [7]. С учётом этого, а также того факта, что в большинстве реальных сплавов концентрация титана значительно превосходит концентрацию других элементов, соотношения (2) принимают вид

$$\begin{cases} \pi_{Ti} \cong k_{Ti} \left(1 - \frac{M_{Ti}}{M_{Al}} [Al] - \frac{M_{Ti}}{M_V} [V]\right); \\ \pi_{Al} \cong \left(\frac{1}{\beta_{Al}\rho} + \frac{M_{Al}}{M_{Ti}k_{Al}}\right)^{-1} [Al]; \\ \pi_V \cong \left(\frac{1}{\beta_V\rho} + \frac{M_V}{M_{Ti}k_V}\right)^{-1} [V], \end{cases}$$

где  $\beta_{Al}$ ,  $\beta_V$  — коэффициенты массопереноса соответственно алюминия и ванадия в жидком титане, м/с.

Так как упругость пара ванадия существенно меньше упругости пара алюминия (при температуре около 2000 К более чем на три порядка), и градиент концентрации этого элемента в поверхностном слое расплава незначителен, то можно принять, что ванадий распределён равномерно по глубине жидкой ванны.

Коэффициент массопереноса алюминия в жидком титане приблизительно равен  $1 \cdot 10^{-5}$  м/с [6].

Таким образом, система уравнений материального баланса (1) приобретает вид

$$\begin{cases} hb\rho v (1 - [Al]_0 - [V]_0) - Sk_{Ti} \left(1 - \frac{M_{Ti}}{M_{Al}} [Al]_1 - \frac{M_{Ti}}{M_V} [V]_1\right) - m_1 (1 - [Al]_1 - [V]_1) = 0; \\ hb\rho v [Al]_0 - S \left(\frac{1}{\beta_{Al}\rho} + \frac{M_{Al}}{M_{Ti}k_{Al}}\right)^{-1} [Al]_1 - m_1 [Al]_1 = 0; \\ hb\rho v [V]_0 - S \frac{M_{Ti}k_V}{M_V} [V]_1 - m_1 [V]_1 = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Для расчёта температурного поля в области воздействия электронных лучей на металл слитка был использован теоретико-экспериментальный метод,

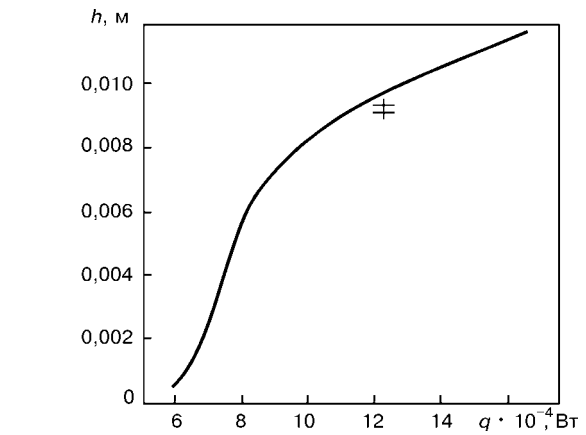


Рис. 4. Зависимость глубины проплавления  $h$  от мощности электронно-лучевой пушки  $q$ ; сплошной линией обозначена теоретическая зависимость глубины проплавления от суммарной мощности электронно-лучевых пушек при скорости движения фокального пятна по поверхности слитка  $v = 0,000322$  м/с, плюсами — экспериментальные данные

разработанный Н. Н. Рыкалиным [8, 9], в соответствии с которым получены зависимости глубины проплавления  $h$  и площади поверхности ванны жидкого металла  $S$  от технологических параметров процесса ЭЛО.

На рис. 3, 4 даны примеры использования упомянутой тепловой модели, показаны зависимости глубины проплавления от мощности электронно-лучевой пушки и скорости перемещения фокального пятна по оплаиваемой поверхности слитка-сляба.

С учётом этих зависимостей система уравнений материального баланса однозначно разрешима относительно неизвестных  $[Al]_1$  и  $[V]_1$ .

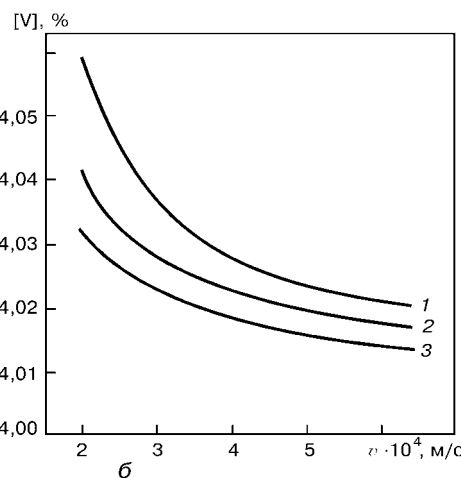
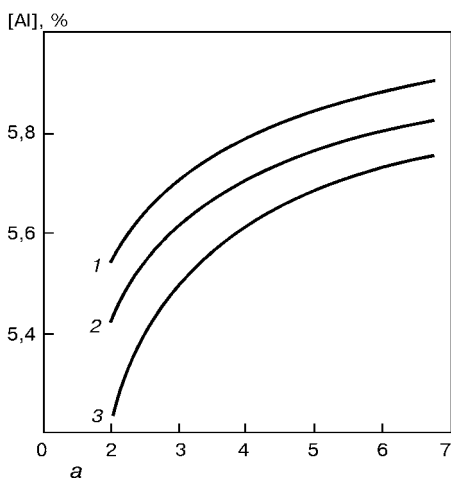


Рис. 5. Зависимость массовых долей алюминия (а) и ванадия (б) в оплавленном поверхностном слое от скорости движения фокального пятна электронного луча по поверхности слитка при различных значениях мощности электронно-лучевой пушки, Вт: 1 — 153850; 2 — 125500; 3 — 100000. Здесь и на рис. 6 ширина слитка достигает 0,94 м; начальная концентрация алюминия и ванадия в слитке составляет соответственно 6,3 и 4,0 %

Рассчитаны зависимости состава оплавленного слоя от таких технологических параметров процесса ЭЛО, как мощность электронно-лучевой пушки и скорость перемещения фокального пятна по оплаиваемой поверхности слитка-сляба (рис. 5, 6).

Первые существенно нелинейны, особенно в области больших значений мощности. Кроме того, если концентрация алюминия с возрастанием мощности уменьшается, то количество ванадия в оплавленном слое, наоборот, монотонно увеличивается. Что касается вторых зави-



симостей, то они также нелинейны и тем больше, чем выше значения приложенной мощности. Для данных зависимостей характерно и то, что с ростом скорости фокального пятна количество алюминия увеличивается, стремясь к начальной концентрации в слитке, тогда как количество ванадия монотонно уменьшается.

Такая существенная разница в характере зависимостей концентраций рассматриваемых элементов связана прежде всего с тем, что уровень упругости паров алюминия и титана больше, чем у ванадия (при температуре 2000 К давление паров алюминия, титана и ванадия составляет соответственно 635,2; 1,0 и 0,4 Па). Кроме того, имеет значение различное поведение коэффициентов активности указанных элементов при изменении температуры.

**Проверка адекватности модели экспериментальным данным.** Адекватность рассмотренной модели проверяли на основе экспериментальных данных, полученных в процессе ЭЛО поверхности слитка-сляба из сплава Ti-6Al-4V.

Процесс оплавления производили в следующем режиме:

мощность источника, кВт	120;
оплавляемая часть поверхности слитка, м:	
длина	0,87;
ширина	0,94;
толщина слитка	0,16;
скорость движения фокального пятна электронного луча по поверхности слитка, м/с	$3,22 \cdot 10^{-4}$ ;
начальная концентрация в слитке, %:	
алюминия	6,3;
ванадия	4,0.

Посредством химического анализа состава оплавленного слоя зафиксировано 5,79 % алюминия и 4,03 % ванадия в оплавленном слое.

Согласно приведенной модели, при данных технологических параметрах процесса ЭЛО поверхности слитка-сляба из сплава указанного состава содержание этих легирующих элементов составляет соответственно 5,67 и 4,0 %.

Экспериментальная оценка глубины проплавления при указанном режиме ЭЛО слитка-сляба показала, что её среднее значение составляет 9 мм. Таким образом, погрешность расчёта локального поля температур в области воздействия электронных лучей не превышает 7 % (рис. 4).

### Выводы

1. Разработана математическая модель, позволяющая описать процессы испарения легирующих элементов при оплавлении слитков-слябов из сплавов на основе титана.

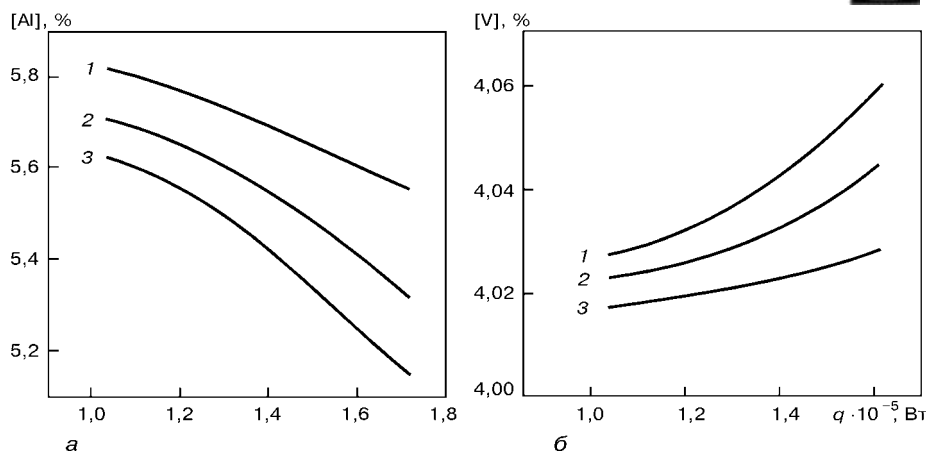


Рис. 6. Зависимость массовой доли алюминия (а) и ванадия (б) в оплавленном поверхностном слое от мощности электронно-лучевой пушки при различных скоростях движения фокального пятна электронного луча по поверхности слитка, м/с: 1 – 0,00050; 2 – 0,00032; 3 – 0,00025

2. В рамках предложенной модели рассмотрены процессы испарения элементов системы Ti-Al-V с учётом температурных зависимостей коэффициентов активности элементов в растворе и характера поведения теплового поля в области воздействия электронных лучей, также получены зависимости состава оплавленного слоя слитка-сляба от технологических параметров процесса ЭЛО.

3. Адекватность разработанной модели подтверждена данными, установленными при ЭЛО поверхности слитка-сляба титанового сплава Ti-6Al-4V. Результаты, полученные в рамках предложенной математической модели, соответствуют экспериментальным данным с высокой степенью точности.

1. *Электронно-лучевое* оплавление слитков титана / А. Н. Пикунин, Г. В. Жук, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин // *Соврем. электрометаллургия*. — 2003. — № 4. — С. 17–19.
2. *Электронно-лучевая* установка УЭ-185 для оплавления поверхностного слоя слитков / Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, А. Н. Пикунин и др. // *Там же*. — 2003. — № 3. — С. 12–14.
3. *Жуховицкий А. А., Шварцман Л. А.* Физическая химия. — М.: *Металлургия*, 1976. — 543 с.
4. *Свойства неорганических соединений*: Справ. / А. И. Ефимов, Л. П. Белорукова, И. В. Василькова, В. П. Чечев — Л.: *Химия*, 1983. — 392 с.
5. *Иванченко Н. В., Устинов А. И., Мохорт В. А.* Термодинамический анализ испарения в вакууме титана и никеля из расплава Ti-Ni // *Соврем. электрометаллургия*. — 2003. — № 3. — С. 15–18.
6. *Mathematical modeling of aluminum evaporation during electron-beam cold-hearth melting of Ti-6Al-4V ingots* / S. V. Akhonor, N. P. Trigub, V. N. Zamkov, S. L. Semiatin // *Metallurgical and Materials Transaction*. — 2003. **34b**, № 8. — P. 447–454.
7. *Электронно-лучевая плавка* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: *Наук. думка*, 1997. — С. 181–198.
8. *Н. Н. Рыкалин*. — *Тепловые основы сварки*. — М.: Изд-во АН СССР, 1947. — Ч.1. — С. 150–170.
9. *Рыкалин Н. Н.* Расчёты тепловых процессов при сварке. — М.: *Машгиз*, 1951. — С. 80–89.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
Поступила 20.05.2005



## ПРОЦЕССЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ ИСПАРЕНИИ СПЛАВОВ И СМЕСЕЙ ВЕЩЕСТВ

А. В. Махоткин, И. С. Малашенко, В. И. Топал

Рассмотрены газодинамические аспекты электронно-лучевого испарения. Обнаружен и исследован эффект пространственного разделения компонентов пара с различной молекулярной массой, суть которого заключается в обогащении конденсата в центре парового потока компонентом с большей молекулярной массой, а на периферии потока — компонентом с меньшей молекулярной массой. Представлены результаты экспериментов по испарению различных сплавов. На основе обнаруженного эффекта предложен способ разделения изотопов.

Gas-dynamic aspects of electron beam evaporation are considered. Effect of space separation of vapor components of a different molecular mass was revealed and investigated, the principle of which consists in condensate enrichment with a component of a large molecular mass in the center of a vapor flow, while at the flow periphery - with a component of a smaller molecular mass. Results of experiments on evaporation of different alloys are presented. A method of isotopes separation has been offered on the basis of the revealed effect.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая технология; интенсивное испарение; динамика разреженных газов; слой Кнудсена; процессы разделения

**Введение.** Способ получения конденсатов металлов путем термического испарения и физического осаждения пара известен уже более ста лет, начиная с экспериментов Фарадея в 1857 г. [1]. Первоначально для этих целей использовали косвенные способы нагрева (резистивный или нагрев тигля, в котором находится испаряемый материал). Скорости испарения и осаждения при этом были невелики. С середины двадцатого века началось интенсивное внедрение в промышленность процессов электронно-лучевого испарения и осаждения материалов в вакууме, которые благодаря использованию мощных концентрированных источников энергии позволили увеличить скорость испарения металлов до 100 кг/ч, а скорость их осаждения — до 100 мкм/мин [2]. Появилась возможность получать не только тонкие пленки, но и сравнительно толстые (более 1 мм) покрытия, конструкционные материалы и изделия. Диапазон применения электронно-лучевой технологии в современной промышленности достаточно широк — коррозионно- и жаростойкие, а также теплозащитные покрытия на деталях газотурбинных установок и двигателей, полупроводниковые устройства, оптические пленки и др.

Одновременно с развитием техники испарения и конденсации развивались представления о физических механизмах, лежащих в основе этого процесса. При изучении механизма переноса пара от

поверхности испарения к подложке изменялось представление о движении пара (от свободно-молекулярного разлета для небольшой интенсивности процесса испарения [1] до сверхзвуковой струи, распространяющейся в вакууме при мощном электронно-лучевом нагреве поверхности [3, 4]). В настоящей работе рассматриваются процессы разделения в паровом потоке, возникающие при электронно-лучевом испарении сплавов или смесей веществ, содержащих компоненты с различной молекулярной массой. Эти процессы имеют ярко выраженную газодинамическую природу.

**Процесс испарения и движения пара от поверхности испарения.** Интенсивность испарения, т. е. количество молекул, покидающих нагреваемую поверхность в единицу времени, определяется в первую очередь ее температурой. Повышение температуры поверхности способствует не только увеличению интенсивности испарения, но (при некоторой температуре) и смене механизмов испарения и движения пара от поверхности испарения. В соответствии с этим различают два режима испарения — слабое и интенсивное [5]. Слабым принято называть такое испарение, при котором молекулы пара после того, как покинут поверхность, свободно удаляются от поверхности с приобретенной скоростью, не сталкиваясь между собой, интенсивным — процесс, при котором количество столкновений молекул между собой над поверхностью испарения настолько велико, что влияет как на сам процесс испарения, так и





на движение пара от поверхности. Картина слабого испарения, когда столкновениями молекул в паре над поверхностью испарения можно пренебречь, хорошо изучена. Процесс интенсивного испарения, при котором испарившиеся молекулы испытывают множество столкновений, более сложен.

При интенсивном испарении вблизи границы раздела фаз возникает характерная область протяженностью в несколько длин свободного пробега молекул. Неравновесный слой пара, находящийся в этой области, в молекулярно-кинетической теории называется слоем Кнудсена. В этом тонком слое происходят первичные столкновения молекул, покидающих поверхность, и начинается формирование парового потока. Далее, за слоем Кнудсена, начиная с его внешней границы, расположена газодинамическая область, в которой поток пара движется перпендикулярно поверхности испарения [5, 6].

В результате множества столкновений в слое Кнудсена некоторая часть молекул попадает обратно на поверхность испарения. От количества испарившихся и возвратившихся обратно молекул зависит «чистая» скорость испарения.

Обратный поток при интенсивном испарении в вакуум рассчитали с привлечением методов кинетической теории газов М. Н. Коган и С. И. Анисимов [7, 8]. Он составлял приблизительно 0,2 потока молекул, вылетающих с поверхности испарения, т. е. из 100 испарившихся с поверхности молекул 20 возвращались обратно. Это позволило записать следующую формулу для определения скорости интенсивного испарения:

$$G = 0,8kp \sqrt{\mu/T},$$

где  $G$  — скорость испарения (массовый расход с единицы поверхности);  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $p$  — давление насыщенного пара испаряемого вещества при температуре  $T$ ;  $\mu$  — молекулярная масса испаряемого вещества;  $T$  — температура поверхности.

Данная формула отличается от известной Герца–Кнудсена наличием коэффициента 0,8, учитывающего обратный поток молекул. С ее помощью можно вычислить температуру поверхности при интенсивном испарении вещества, если известна скорость испарения.

При удалении от поверхности в режиме интенсивного испарения в движении пара происходят следующие изменения. На внешней границе слоя Кнудсена поток пара движется перпендикулярно поверхности с околосвуковой скоростью. Удаляясь от поверхности, пар начинает расширяться в вакуум, что обусловлено его собственной упругостью. Скорость движения пара возрастает, и поток становится сверхзвуковым. При этом расширение пара происходит не только перпендикулярно поверхности, но и в боковых направлениях, в результате чего формируется струя пара. Боковое расширение становится существенным на расстояниях от поверхности испарения, составляющих примерно ее линейный раз-

мер, например в случае электронно-лучевого испарения — диаметр тигля. (При формировании потока в слое Кнудсена бокового движения нет, поскольку его толщина ничтожна по сравнению с размерами тигля).

Распределение плотности потока пара в пространстве при интенсивном испарении отличается от такового при слабом. Для последнего справедлив закон косинуса, согласно которому плотность потока  $n$  пара пропорциональна косинусу угла его отклонения от нормали к поверхности испарения  $\varphi$  [2]:

$$n/n_0 = \cos \varphi,$$

где  $n_0$  — плотность потока пара на его оси.

Для процесса интенсивного испарения плотность потока пара обычно описывают формулой

$$n/n_0 = \cos^x \varphi,$$

где  $x$  — эмпирический коэффициент, равный 2...6 [2].

Таким образом, поток пара при интенсивном испарении сужается, по сравнению со слабым, и имеет более направленный характер.

Подытоживая основные особенности, отметим, что слабое и интенсивное испарения — процессы, существенно отличающиеся как в приповерхностном слое, так и в области дальнейшего движения пара от поверхности испарения.

Основные характеристики слабого испарения заключаются в низкой температуре поверхности; удалении от поверхности 100% испарившихся молекул без их возврата на поверхность испарения; движении пара в виде свободно-молекулярного разлета; распределении плотности потока пара в пространстве в соответствии с законом косинуса.

Основные характеристики интенсивного испарения состоят в высокой температуре поверхности; возвращении на поверхность 20% испарившихся молекул; движении пара в виде сверхзвуковой струи, расширяющейся в вакууме; сопровождении распределения плотности потока пара сужением потока, по сравнению с косинусным.

Между этими двумя режимами существует процесс, при котором с увеличением температуры поверхности происходит переход к режиму движения пара как сплошной среды и формирование струи пара. При дальнейшем увеличении температуры поверхности испаряемого материала качественных изменений в процессе испарения и характере движения струи пара не происходит. В уже сформировавшемся режиме интенсивного испарения с повышением температуры поверхности скорость испарения возрастает, но коэффициент в формуле Герца–Кнудсена, определяющий «чистую» скорость испарения, остается по-прежнему равным 0,8.

В большинстве современных электронно-лучевых технологических процессов скорости испарения сравнительно высоки, т. е. имеется выраженное интенсивное испарение.

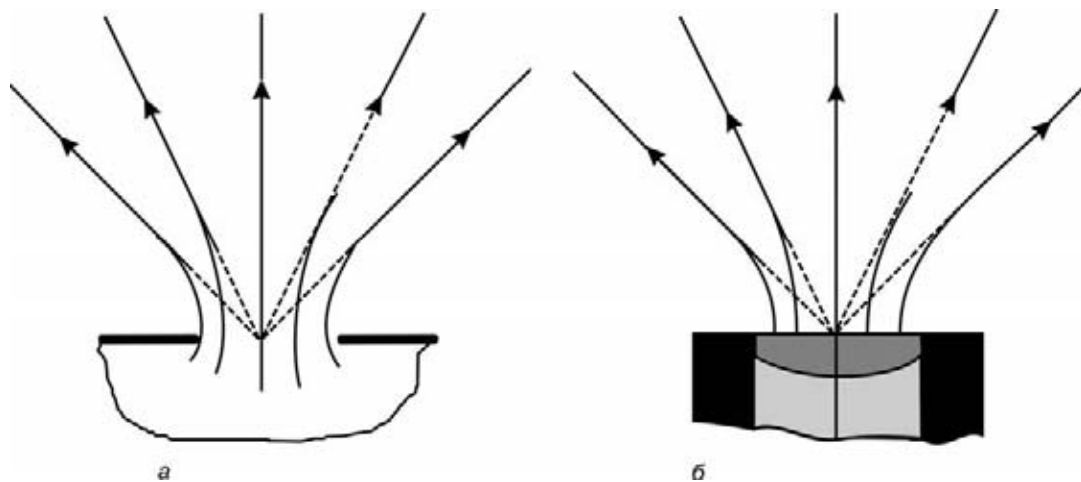


Рис. 1. Форма струи и направление линий тока для потока газа, истекающего из сосуда через отверстие в вакуум (а) и для потока пара при интенсивном электронно-лучевом испарении (б)

Движение пара при интенсивном испарении в вакууме во многом подобно движению газа при истечении в вакуум из сосуда через отверстие в стенке. Сравним картину течения в этих двух случаях.

Двигаясь к отверстию внутри сосуда, газовый поток ускоряется за счет перепада давления и, проходя через плоскость, где лежит отверстие, набирает скорость, равную скорости звука, вектор которой направлен перпендикулярно плоскости отверстия [9,10]. При дальнейшем движении газ расширяется во всех направлениях, и поток становится сверхзвуковым (рис. 1, а). На рисунке показаны линии тока — траектории движения микроскопических объемов газа.

В случае потока пара при интенсивном испарении его формирование происходит в слое Кнудсена, на внешней границе которого скорость достигает значений скорости звука и направлена перпендикулярно плоскости поверхности испарения [11]. При дальнейшем движении поток пара расширяется во всех направлениях и становится сверхзвуковым (рис. 1, б).

Таким образом, направление линий тока и характер течения в этих двух случаях аналогичны,

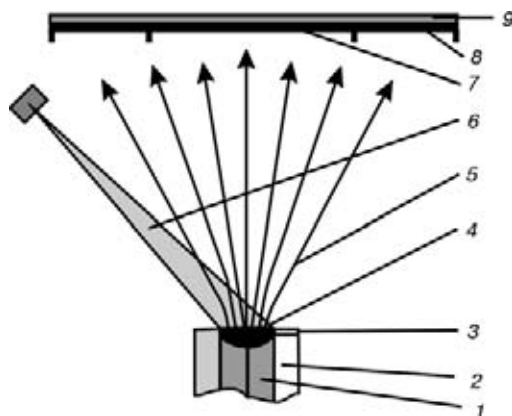


Рис. 2. Разделение компонентов пара при электронно-лучевом испарении: 1 — слиток разделяемой смеси; 2 — тигель; 3 — расплавленная ванна; 4 — поверхность испарения; 5 — линии тока пара; 6 — электронный луч; 7, 8 — зоны конденсата, обогащенные соответственно тяжелым и легким компонентами; 9 — подложка

что позволяет использовать хорошо развитый аппарат газовой динамики при изучении процесса электронно-лучевого испарения. В частности, для оценки углового распределения толщины конденсата при электронно-лучевом испарении могут быть использованы формулы, описывающие плотность потока в струе газа, истекающего из сопла в вакуум [10].

**Эффект разделения компонентов с различной молекулярной массой в потоке пара при интенсивном электронно-лучевом испарении.** Существует область научного поиска и ряд отраслей индустрии, касающихся процессов разделения смесей, т. е. выделения одного из веществ из их природной смеси или обогащения смеси каким-либо компонентом. Одним из направлений этой деятельности является разделение изотопов, базирующее на различии свойств изотопов и их соединений, а также на разности масс их атомов. Для большинства элементов относительная разность масс изотопов весьма незначительна, и это усложняет задачу. Обычно наиболее производительными являются так называемые обратимые способы разделения (фракционная перегонка или химический обмен) [12]. Исключения составляют трудные для разделения изотопы — элементы с большой молекулярной массой, например изотопы урана  $U^{235}$  и  $U^{238}$ . В этих случаях экономически целесообразными становятся процессы, базирующиеся на необратимом молекулярном движении. К ним относятся способы разделения изотопов, основанные на эффектах разреженности в газах (газовая диффузия через пористые перегородки, газовое центрифугирование, сопло Беккера, вихревые трубки и др.) [13, 14].

Нами установлено, что при интенсивном электронно-лучевом испарении происходит разделение пара на компоненты с различной молекулярной массой; в центре парового потока конденсат обогащается компонентом с большей молекулярной массой, а на периферии потока — с меньшей (рис. 2). Этот эффект может быть использован, в частности, для разделения изотопов и смесей веществ.

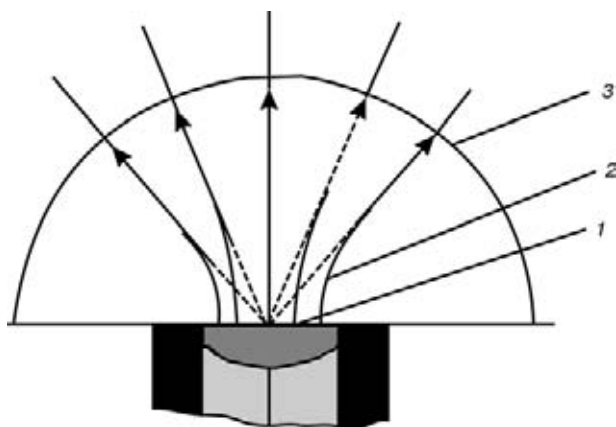


Рис. 3. Расположение подложки в виде дуги полуокружности относительно тигля: 1 — поверхность испарения; 2 — линии тока пара; 3 — подложка

Для изучения обнаруженного эффекта на лабораторной электронно-лучевой установке проведены эксперименты, в которых испаряли сплавы, состоящие из двух или более компонентов. Методика проведения экспериментов заключалась в следующем.

Испаряемый слиток помещали в медный водоохлаждаемый тигель. При помощи электронной пушки с ускоряющим напряжением 20 кВ слиток нагревали до расплавления и достижения необходимой температуры испарения. Ток луча испаряющей пушки составлял для разных сплавов от 1,8 до 3,0 А. Процесс осаждения проводили в вакууме при остаточном давлении  $1,3 \cdot 10^{-1} \dots 1,0 \cdot 10^{-2}$  Па. Пар конденсировался на подложку в виде дуги полуокружности радиусом 250 мм с центром, совпадающим с центром тигля (рис. 3), либо на плоскую подложку, находящуюся над тиглем на высоте 300 мм. Температура подложки составляла 400 °С для сплава Al-Sn и 700 °С для всех остальных сплавов. Скорость испарения сплавов из тигля диаметром 70 мм — от 0,5 до 1,2 мм/мин; скорость осаждения парового потока в центре конденсата — от 8 до 30 мкм/мин; толщина конденсата в центре над тиглем — 850 мкм

Таблица 1. Содержание элементов в исходных сплавах

Сплав	Массовая доля элементов, %								
	Ni	Co	Cr	Al	Y	Fe	Ti	V	Zr
Ni-Co-Cr-Al-Y	48	22	18	12	0,2	-	-	-	-
Ni-Cr-Al	74	-	17	9	-	-	-	-	-
Fe-Ni	52	-	-	-	-	48	-	-	-
Cr-Fe	-	-	86	-	-	14	-	-	-
Ti-Al-V	-	-	-	5,3	-	-	90	3,9	< 0,2

в эксперименте со сплавом Ni-Co-Cr-Al-Y и 200... 500 мкм в других экспериментах. Анализировали химический состав поверхности конденсатов в различных точках подложки. Использовали метод рентгеновской спектрофотометрии (XRF-метод).

Для проведения экспериментов применяли бинарные и многокомпонентные сплавы на основе никеля, титана, хрома, алюминия, кремния. Химический состав исходных сплавов приведен в табл. 1.

Методика проведения экспериментов несколько отличалась для разных сплавов:

для испарения исходных сплавов Ni-Co-Cr-Al-Y, Ni-Cr-Al, Fe-Ni, Cr-Fe и Ti-Al-V использовали слитки диаметром 70 мм. Слитки получали с помощью двухстадийного процесса вакуумно-индукционной плавки с последующим электронно-лучевым переплавом;

при испарении сплавов Ni-Co-Cr-Al-Y, Ni-Cr-Al, Fe-Ni, Ti-Al-V применяли способ высокоскоростного испарения, при котором на торце слитка предварительно формируется промежуточная ванна-посредник, куда входят тугоплавкие металлы (ниобий, вольфрам, тантал, гафний), сплавляемые с основным материалом. Сформированная таким образом ванна-посредник используется для уменьшения конвективного движения расплавленного материала, что способствует увеличению температуры

Таблица 2. Содержание элементов в конденсате при экспериментах с плоской подложкой

Сплав	Элементы	Молекулярная масса	Массовая доля элементов, %, при расстоянии точки конденсата от оси тигля, мм							
			0	60	80	100	140	160	200	
Si-Y	Si	28	63,5	-	64,5	-	-	-	79,9	-
	Y	89	36,5	-	34,9	-	-	-	20,1	-
Fe-Ni	Fe	56	47,7	-	-	47,8	-	-	-	48,6
	Ni	59	52,2	-	-	52,1	-	-	-	51,3
Cr-Fe	Cr	52	85,7	85,8	-	-	-	-	86,2	-
	Fe	56	14,2	14,13	-	-	-	-	13,8	-
Ni-Cr-Al	Ni	59	74,2	-	73,7	-	-	-	-	71,8
	Cr	52	16,2	-	16,6	-	-	-	-	17,8
	Al	27	9,4	-	9,6	-	-	-	-	10,2
Ti-Al-V	Ti	48	90,4	-	-	-	90,30	-	-	90,0
	Al	27	5,2	-	-	-	5,40	-	-	5,90
	V	51	3,9	-	-	-	3,80	-	-	3,69
	Zr	91	0,1	-	-	-	0,09	-	-	0,08

**Таблица 3. Содержание элементов в конденсате при экспериментах с подложкой в виде дуги полуокружности**

Сплав	Элемент	Молекулярная масса	Массовая доля элементов, %, при угле отклонения от нормали к поверхности испарения, проведенной из центра тигля, град								
			0	10	20	30	40	50	60	70	80
Ni-Co-Cr-Al-Y	Ni	59,0	48,30	48,30	46,80	45,70	44,00	41,80	39,60	35,90	33,70
	Co	58,9	23,00	22,50	21,70	21,30	20,50	19,70	18,20	16,80	
	Cr	52,0	16,80	17,00	17,40	19,10	21,30	23,60	25,00	27,00	26,90
	Al	27,0	11,90	12,00	13,30	13,30	13,20	13,90	15,60	18,80	22,50
	Y	89,0	0,18	0,18	0,15	0,14	0,14	0,11	0,09	0,06	0,01
Al-Sn	Al	27,0	84,90	–	–	90,10	–	–	90,80	–	–
	Sn	89,0	15,10	–	–	9,90	–	–	9,20	–	–

поверхности расплава, а также уменьшению разбрызгивания металла [15, 16]. В ходе процесса тугоплавкие добавки с низкой упругостью пара практически не испаряются, а только обеспечивают рост скорости испарения основного металла. Этот прием применяется нами для изменения технологических параметров процесса (увеличения скорости испарения и уменьшения разбрызгивания металла без особого влияния на процесс разделения компонентов);

сплавы Si-Y и Al-Sn предварительно подготавливали путем сплавления компонентов в тигле диаметром 70 мм и глубиной 30 мм с помощью электронно-лучевого нагрева малой мощности;

для всех сплавов эксперимент при одинаковых параметрах процесса проводили дважды, для сплава Ti-6 % Al-4 % V — десять раз.

Результаты химического анализа конденсата, взятого в различных точках подложки, приведены в табл. 2, 3, а также на рис. 4.

Анализ химического состава конденсатов показал, что в центре над тиглем по оси парового потока всегда повышено количество компонентов с большей молекулярной массой, на периферии подложки их меньше, а легких компонентов соответственно больше.

Эффект изменения концентрации элементов вдоль подложки в соответствии с их молекулярными массами зафиксирован в каждом эксперименте. Для экспериментов рассчитывали изменение относительной концентрации  $K_{отн}$  элементов вдоль подложки, вычисленное как отношение разности кон-

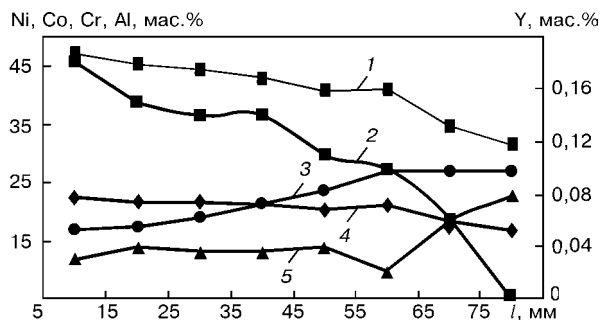


Рис. 4. Изменение химического состава конденсата вдоль подложки для сплава Ni-22 % Co-18 % Cr-12 % Al-0,2 % Y: 1 — Ni (59); 2 — Y (89); 3 — Cr (52); 4 — Co (59); 5 — Al (27); здесь и на рис. 5, 6 в скобках указаны значения молекулярных масс элементов;  $l$  — расстояние от центра тигля

центраций элемента в рассматриваемой точке  $C$  и в центре конденсата  $C_{ц}$  к концентрации этого элемента в центре конденсата  $C_{ц}$ :

$$K_{отн} = (C - C_{ц}) / C_{ц}$$

Изменения относительной концентрации элементов конденсата для сплава Ti-6 % Al-4 % V приведены на рис. 5. Координата 0 на оси абсцисс соответствует центру тигля. На рисунке приведено изменение средних значений в серии (показано линиями), а также разброс вычисленных значений для отдельных экспериментов этой серии (показано вертикальными полосами). Концентрация на периферии подложки, по сравнению с центром конденсата, растет для элемента с меньшей молекулярной массой (алюминия) и уменьшается для элементов с большей молекулярной массой (титана, ванадия, циркония). Изменение концентрации примеси циркония вдоль поверхности конденсации подчиняется общей закономерности, определяемой молекулярной массой компонентов пара.

Изменение относительной концентрации элементов вдоль подложки для разных сплавов представлено на рис. 6.

Механизм разделения веществ при интенсивном электронно-лучевом испарении можно представить следующим образом. При испарении молекулы материала покидают поверхность и сталкиваются между собой. В результате частых столкновений над поверхностью испаряемого материала образуется

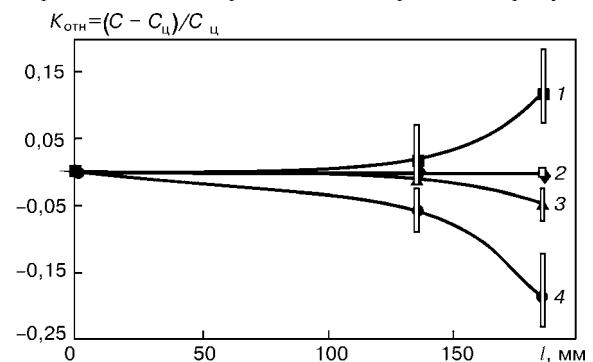


Рис. 5. Изменение относительной концентрации компонентов конденсата вдоль подложки для сплава Ti-6 % Al-4 % V: 1 — Al (27); 2 — Ti (48); 3 — V (51); 4 — Zr (91)

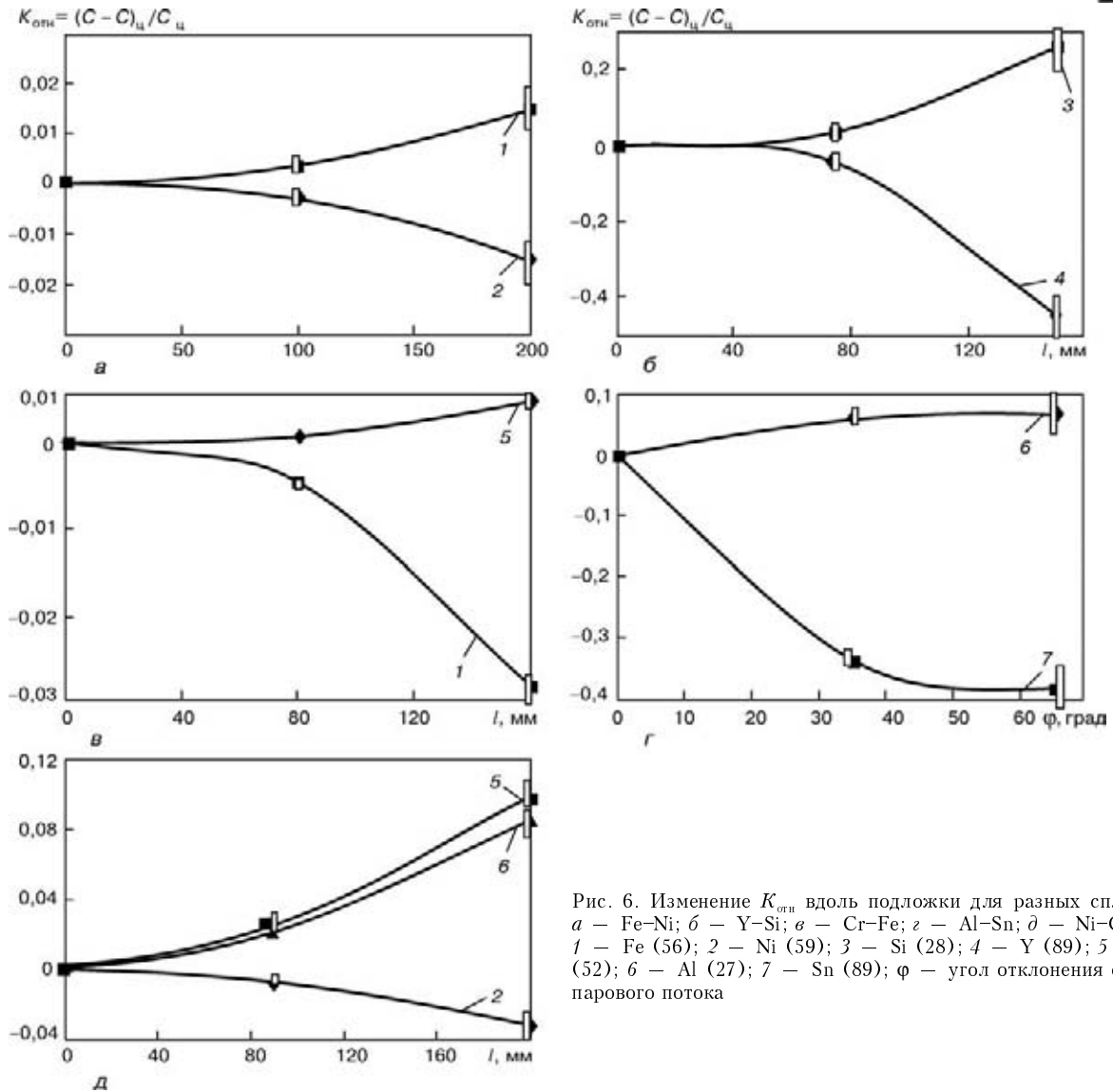


Рис. 6. Изменение  $K_{\text{отн}}$  вдоль подложки для разных сплавов: а — Fe-Ni; б — Y-Si; в — Cr-Fe; г — Al-Sn; д — Ni-Cr-Al; 1 — Fe (56); 2 — Ni (59); 3 — Si (28); 4 — Y (89); 5 — Cr (52); 6 — Al (27); 7 — Sn (89);  $\phi$  — угол отклонения от оси парового потока

слой пара с некоторым давлением. Далее пар расширяется в вакуум и за счет этого ускоряется в направлении нормали к поверхности. При этом формируется струя пара, в дальнейшем расширяющаяся не только перпендикулярно к поверхности, но и в разные стороны. Линии тока, по которым движется пар, искривляются, и появляется центробежная сила, действующая на тяжелые молекулы с большей силой, чем на легкие. Это вызывает увеличение скорости диффузии тяжелых молекул к центру струи, что и приводит к разделению компонентов в струе. Такая разновидность диффузии называется бародиффузией, поскольку для ее появления необходим градиент давления, возникающий в данном случае в паре из-за воздействия центробежного ускорения на молекулы пара при их движении вдоль линий тока. Центробежное ускорение можно оценить с учетом скорости движения пара у поверхности испарения (примерно равной скорости звука) и кривизны линий тока (примерно радиус тигля).

Далее пар конденсируется на подложке, расположенной на пути его распространения. В центре подложки формируется конденсат, обогащенный

компонентом с большей молекулярной массой, на краю — компонентом с меньшей молекулярной массой. Время ( $1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-4}$  с), за которое струя пара преодолевает расстояние в 0,3 м от тигля до подложки, оказывается вполне достаточным для того, чтобы в результате диффузии существенно изменилась концентрация элементов на подложке.

Необходимым условием получения эффекта разделения является достижение уровня интенсивности испарения, требуемого для образования струи пара. Если интенсивность испарения меньше, то происходит бесстолкновительное движение испарившихся молекул. При свободно-молекулярном разлете молекулы с разной массой распределяются по направлениям с совершенно одинаковой интенсивностью, и разделения на тяжелые и легкие компоненты не происходит.

Для бинарных смесей описанный выше процесс разделения способствует обогащению центральной части парового потока тяжелым компонентом и обеднению легким. Для многокомпонентных смесей изменение концентрации каждого конкретного компонента будет зависеть от соотношения его молеку-



лярной массы и средней молекулярной массы пара. Центральная часть конденсата обогатится компонентами, имеющими молекулярную массу больше средней, и обеднится компонентами с молекулярной массой меньше средней. Именно такой характер взаимосвязи изменения концентраций и молекулярных масс элементов зафиксирован в экспериментах, проведенных с многокомпонентными сплавами. Например, для сплава Ni–22 % Co–18 % Cr–12 % Al–0,2 Y % (рис. 4, а) в центре конденсата обнаружено увеличение содержания тяжелого компонента (иттрия) и уменьшение содержания легкого компонента (алюминия). Для сплава Ti–6 % Al–4 % V (рис. 5) прирост концентрации по сравнению с центром конденсата положителен для элементов, у которых молекулярная масса меньше средней молекулярной массы пара (алюминий,  $\mu = 27$ ), и отрицателен для элементов с молекулярной массой больше средней (титан,  $\mu = 47,9$ ; ванадий,  $\mu = 51$ ; цирконий,  $\mu = 91,2$ ). Характерно то, что степень изменения относительной концентрации элемента тем выше, чем больше разность молекулярной массы этого элемента и средней молекулярной массы пара. Для сплава Ti–6 % Al–4 % V она равна 45,8... 46,5. Средняя молекулярная масса сплава может быть рассчитана по формуле

$$\mu_{\text{ср}} = n_{\text{Ti}} \mu_{\text{Ti}} + n_{\text{Al}} \mu_{\text{Al}} + n_{\text{V}} \mu_{\text{V}},$$

где  $\mu_{\text{ср}}$  — средняя молекулярная масса;  $\mu_{\text{Ti}}$ ,  $\mu_{\text{Al}}$ ,  $\mu_{\text{V}}$  — молекулярные массы соответственно титана, алюминия, ванадия;  $n_{\text{Ti}}$ ,  $n_{\text{Al}}$ ,  $n_{\text{V}}$  — молярные концентрации в сплаве соответственно титана, алюминия, ванадия.

В эксперименте со сплавом Cr–Fe) испарение происходило не с жидкой, а с твердой поверхности (путем сублимации). На основе полученных результатов сделан вывод о том, что разделение путем сублимации также возможно, если давление паров компонентов разделяемой смеси при достигнутой температуре поверхности достаточно для поддержания интенсивного испарения и образования струи пара.

Рассматриваемое разделение компонентов по молекулярным массам не является единственной причиной возникновения неоднородности химического состава конденсата вдоль подложки при интенсивном электронно-лучевом испарении. На однородность распределения химического состава конденсата воздействуют многие факторы (неравномерность химического состава поверхности испарения или неполная конденсация, и/или реиспарение одного из компонентов пара на подложке, что, предположительно, является причиной часто фиксируемого для сплавов типа Ni–(Co)–Cr–Al–Y уменьшения содержания хрома в центре конденсата [17]). Однако ни один из них не может объяснить корреляцию между изменением химического состава и молекулярной массой компонентов пара.

Зафиксированный эффект разделения является негативным при нанесении многокомпонентных покрытий на изделия с большими размерами, пос-

кольку следствием его является неоднородность химического состава конденсата вдоль поверхности изделия.

Разделение пара на компоненты с различной молекулярной массой при интенсивном электронно-лучевом испарении может быть использовано в качестве основы способа разделения изотопов, состоящего из следующих этапов:

испарение разделяемого вещества в вакууме с интенсивностью, достаточной для образования струи пара;

осаждение пара на подложке и получение в ее центральной части конденсата, обогащенного тяжелым изотопом, а на периферии — легким изотопом.

Разделение изотопов с помощью рассмотренного способа имеет следующие преимущества. Все способы, основанные на эффектах разреженности в газах, включают преобразование разделяемой смеси в газообразное состояние перед процессом разделения и обратное преобразование после него. При разделении изотопов и смесей веществ путем интенсивного электронно-лучевого испарения необходимость в проведении подобных химических операций отпадает. Кроме того, способ разделения путем непосредственного испарения применим практически к любым элементам, независимо от того, имеют ли они подходящие газообразные соединения. При прочих равных условиях эффективность разделения изотопов чистого вещества больше, чем его газообразного соединения и зависит от относительной разности масс разделяемых молекул, равной отношению разности масс молекул разных изотопов к абсолютной массе молекулы. Преобразование изотопной смеси в газообразное состояние уменьшает относительную разность масс молекул, содержащих изотопы, и затрудняет разделение.

У предлагаемого способа разделения изотопов и смесей веществ при интенсивном испарении существует газодинамическая аналогия — разделение смеси газов или изотопов в сверхзвуковой струе, истекающей в пространство с пониженным давлением [18, 19]. В соответствии с этим способом, газовая смесь истекает через звуковое или сверхзвуковое сопло из сосуда в пространство с пониженным давлением и под воздействием перепада давлений приобретает сверхзвуковую скорость. Далее газовый поток механически, с помощью диафрагмы или экрана, разделяется на две части — центральную и периферийную. При таком истечении из сопла ядро газовой струи обогащается компонентом с большей молекулярной массой, а периферийная часть струи — с меньшей.

Для получения разделения в газовой струе необходимо, чтобы степень разрежения газа находилась в пределах определенного диапазона (число Кнудсена, определяющее этот диапазон, должно составить  $5 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-1}$ ) [14]. Соответственно, физическая возможность существования эффекта разделения при интенсивном электронно-лучевом испарении появляется благодаря тому, что степень



разрежения пара в этом процессе попадает в диапазон разреженности, необходимый для разделения в струе газа.

Существование подобных эффектов разделения в двух внешне разных процессах (электронно-лучевое испарение и истечение струи газа в пространство с пониженным давлением) демонстрирует единую природу механизмов, лежащих в основе этих процессов.

Факт возникновения неравномерности химического состава конденсата вдоль поверхности осаждения при интенсивном испарении отмечался в работе [20], но причина неравномерности не была установлена, как и механизм ее возникновения. Совершенно очевидно, что причина обнаруженной ранее неравномерности химического состава конденсата могла быть определена, исходя из подобия процессов испарения и истечения газа в вакуум.

Использование эффектов и зависимостей более развитого аппарата газовой динамики представляет дополнительные возможности в исследовании электронно-лучевого испарения и процессов разделения. Например, эффективность разделения изотопов, происходящего в струе газа или в разделяющем сопле, резко повышается, если разделяемый газ разбавить вспомогательным газом-носителем с малой молекулярной массой (обычно водородом или гелием) [21]. Это является результатом того, что поток более легкого газа имеет более высокую скорость истечения из сопла.

Можно предположить, что в случае электронно-лучевого испарения предварительное добавление к разделяемой смеси (сплаву) избытка вспомогательного вещества с меньшей молекулярной массой также приведет к увеличению коэффициента разделения. После разделения вспомогательное вещество должно быть удалено из состава конденсата физическим или химическим способом. Очевидно, что при электронно-лучевом испарении могут быть реализованы и другие способы разделения, известные в динамике разреженных газов (разделение изотопов с помощью зонда или пересекающихся струй) [14].

## Выводы

1. Рассмотрены некоторые газодинамические аспекты интенсивного электронно-лучевого испарения. Обнаружен и исследован эффект разделения компонентов пара с различной молекулярной массой, возникающий при интенсивном электронно-лучевом испарении. На основе этого эффекта предложен способ разделения изотопов.

2. Изучение процессов испарения и конденсации ограничилось этапом переноса пара от поверхности испарения к подложке. Газодинамические аспекты процесса конденсации на подложке в работе не за-

тронуты, хотя они оказывают существенное влияние на свойства конденсатов.

3. Исследование газодинамических аспектов процесса интенсивного испарения в электронно-лучевой технологии перспективно для управления движением потока пара и целенаправленного воздействия на свойства вакуумных конденсатов.

1. *Технология тонких пленок: Справочник* / Под ред. Л. Майсселла, Р. Глэнга. В 2 т. — М.: Сов. радио, 1977. — Т. 1. — 664 с.
2. Шиллер Э., Гайзиг У. *Электронно-лучевая технология*. — М.: Энергия, 1980. — 528 с.
3. Preuss D. R., Pace S. A. The supersonic expansion of pure copper vapor // *J. chem. phys.* — 1979. — **71**, № 9. — P. 3553–3560.
4. Zhou X. W., Johnson R. A. A molecular dynamics study of nickel vapor deposition // *Acta mater.* — 1997. — **45**, № 4. — P. 1513–1524.
5. Лабунцов Д. А., Крюков А. П. Процессы интенсивного испарения // *Теплоэнергетика*. — 1977. — № 4. — С. 8–11.
6. Анисимов С. И. Действие излучения большой мощности на металлы. — М.: Наука, 1970. — 272 с.
7. Анисимов С. И. Испарение металла под действием лазерного облучения // *Журн. эксперимент. техн. физики*. — 1968. — № 54. — С. 339–342.
8. Коган М. Н., Макашев Н. К. О роли слоя Кнудсена в теории гетерогенных реакций и в течениях с реакциями на поверхности // *Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа*. — 1971. — № 6. — С. 3–11.
9. Коган М. Н. Динамика разреженного газа. — М.: Наука, 1967. — 192 с.
10. Ребров А. К. Динамика расширения газа в вакуум // *Вакуумные технологии и оборудование: Сб. докл. 4-го Междунар. симп. (Харьков, 23–27 апр. 2001 г.)*. — Харьков, 2001. — С. 6–15.
11. Анисимов С. И., Рахматуллина А. Х. Динамика расширения пара при испарении в вакуум // *Журн. эксперимент. техн. физики*. — 1973. — **64**, № 3. — С. 869–876.
12. Шемя М. Разделение изотопов. — М.: Атомиздат, 1980. — 169 с.
13. *Report on uranium isotope separation review* / Benedict M., Berman A., Biglisen J. et al. — Oak Ridge, 1972. — 10 p.
14. Муц Е., Гамель Б. Эффекты разреженности в газах и разделение изотопов // *Динамика разреженных газов* / Под ред. В. П. Шидловского — М.: Мир, 1976. — 336 с.
15. *Pat. 5,474,809 USA, ICl<sup>6</sup> B05D 3/06, C23C 16/00. Evaporation method* / D. W. Skelly, M. R. Jackson — Publ. 12.12.1995.
16. *Pat. 21807 Украина, ICl<sup>6</sup> C23C14/00. Способ высокоскоростного испарения металлов и сплавов с использованием ванны-посредника* / Б. А. Мовчан, В. И. Топал, А. В. Корж. — Оpubл. 15.09.2001; Бюл. № 15.
17. *Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления* / Б. Е. Патон, Г. Б. Строганов, С. Т. Кишкин и др. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
18. *Pat. 2,607,439 USA, ICl<sup>2</sup> B01D. Separation of gases from mixtures* / S. P. Dickens, C. A. Coghlan — Publ. 19.08.1952.
19. Боровков И. С., Санкович В. М. Сепарация бинарной газовой смеси в свободной струе, истекающей в вакуум // *Ученые зап. ЦАГИ*. — 1970. — **1**, № 3. — С. 109–113.
20. *Physical vapor deposition*. — Berkeley, 1976. — 190 p.
21. Виллани С. Обогащение урана. — М.: Металлургия, 1983. — 354 с.

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

Поступила 02.06.2005



## УТИЛИЗАЦИЯ ЛОМА ТАНТАЛА СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ

И. Ю. Варич, С. В. Ахонин, Н. П. Тригуб

Представлены результаты экспериментальных исследований по утилизации различных типов лома тантала способом электронно-лучевой плавки. Создана оптимизированная технология получения качественных слитков-слябов тантала при максимальном выходе годного металла. Показано, что электронно-лучевое оплавление поверхности танталовых слитков-слябов позволяет осуществлять их прокатку в ленту без промежуточной операцииковки.

Results of experimental investigations for utilization of different types of tantalum scrap by the method of electron beam melting are presented. Optimized technology of producing quality ingots-slabs at maximum yield of efficient metal was developed. It is shown that the electron beam surface melting of tantalum ingots-slabs allows realizing its rolling into strip without intermediate operation of forging.

**Ключевые слова:** тантал; электронно-лучевая плавка; утилизация отходов; рафинирование; выход годного металла

Развитие современной техники во многом связано с применением новых металлических материалов, имеющих более высокие показатели эксплуатационных характеристик в экстремальных условиях и уникальные физико-механические и химические свойства. К данным металлам относится тантал.

Сочетание таких физико-химических свойств тантала, как высокая температура плавления, низкое парциальное давление паров, коррозионная стойкость, высокие значения теплопроводности и пластичности, делают этот металл уникальным конструкционным материалом для электронной промышленности, а также химического машиностроения [1, 2]. Тантал является биосовместимым материалом и поэтому используется в хирургии.

В связи с большой способностью тантала к поглощению газов при повышенных температурах процесс получения его слитков и сплавов осуществля-

ется в вакууме. Анализ различных способов выплавки танталовых слитков показал [2, 3], что наиболее перспективным способом утилизации лома тантала является электронно-лучевая плавка (ЭЛП), обеспечивающая наибольшую степень его рафинирования при наименьших затратах. При ЭЛП отсутствует необходимость в такой трудоемкой операции, как изготовление компактного расходоуемого электрода.

Поскольку в Украине отсутствуют месторождения танталсодержащих руд и производство танталовых слитков из первичной шихты, то разработка технологии утилизации различных типов лома тантала является актуальной задачей.

Экспериментальные исследования проводили на лабораторной электронно-лучевой установке УЭ-208 [4], на которой из танталового лома выплавляли слитки-слябы прямоугольного сечения.

В качестве шихты использовали лом тантала следующих типов: аноды электролитических конденсаторов, спеченные из танталового порошка; обрезь проволоки и ленты тантала; танталовую стружку.

Размеры кусков лома не превышали 5 × 30 × 100 мм. Поверхность лома всех типов очищали от различных видов загрязнения, а аноды конденсаторов предварительно протравливали в кислоте.

С целью исследования влияния различных типов танталового лома на качество получаемого плоского слитка производили шихтовку исходной заготовки из лома только первого или второго типов, а также с добавлением 50 % танталовой стружки.

Химический состав лома тантала различных типов приведен в табл. 1. Как видно из таблицы, аноды конденсаторов содержат повышенное количество молибдена и ниобия, а обрезь и стружка тантала

Таблица 1. Химический состав лома тантала

Тип шихты	Массовая доля элементов, %						
	Mo	Nb	Ti	Ni	Fe	O	N
1	0,13	0,17	<0,005	<0,005	<0,005	0,84	0,012
2	<0,005	<0,005	0,032	0,31	<0,005	0,03	0,014
3	<0,005	<0,005	0,017	0,41	0,12	–	–

Примечания: 1. Количество химических элементов вычисляли как среднее значение трех измерений. 2. Содержание кислорода и азота в танталовой стружке не определяли из-за ее мелкого фракционного состава. 3. Тантал — основа.





загрязнены титаном и никелем, последняя, кроме того, — еще и железом.

Формирование расходуемого электрода осуществляли в нерасходуемом коробе поперечным сечением 150 × 250 мм. Суть процесса плавки заключается в горизонтальной подаче исходной шихты с определенной скоростью в зону плавки и ее плавлении электронными лучами над изложницей, в которой происходит формирование слитка (рис. 1). Плавку осуществляли непосредственно в глухдонную прямоугольную изложницу 365 × 220 мм глубиной 80 мм.

В процессе плавки жидкую ванну постоянно поддерживали на всей поверхности слитка-сляба, но для уменьшения потерь тантала из-за испарения распределение мощности электронно-лучевого нагрева в изложнице было неравномерным. Более половины мощности вкладывали в зону плавки возле одной из узких граней изложницы, куда из нерасходуемого короба подавали лом тантала и где происходило его плавление пушками 3 и 4 (рис. 1). Нагрев остальной поверхности расплава осуществляли путем сканирования электронного луча пушки 5 для обеспечения равномерного растекания жидкого металла по всей площади изложницы. Электронно-лучевая пушка 6 осуществляла нагрев периферийной зоны контакта жидкого металла с рабочими стенками изложницы для обеспечения качественной боковой поверхности слитка-сляба.

При проведении экспериментальных плавков проводили тщательный контроль стабильности та-

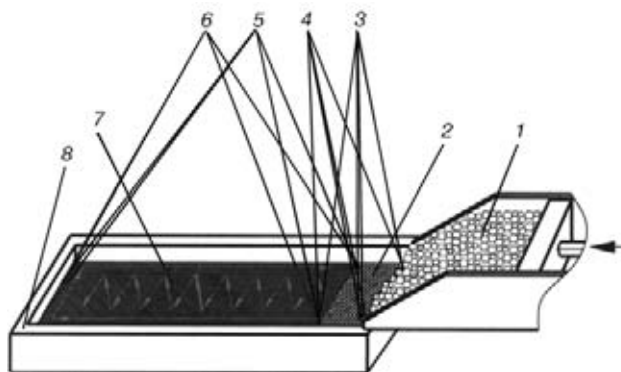


Рис. 1. Схема электронно-лучевой плавки лома тантала в изложницу: 1 — лом тантала; 2 — зона плавки; 3–6 — электронно-лучевые пушки; 7 — наплавленный слиток-сляб; 8 — изложница

ких технологических параметров, как скорость плавки, ускоряющее напряжение и ток луча. Скорость плавки регулировали скоростью подачи исходной шихты в зону плавки, а численные значения ускоряющего напряжения и тока луча измеряли соответствующими приборами. Всего проведено шесть экспериментальных плавков (табл. 2).

Анализ химического состава выплавленных слитков-слябов (табл. 3) показал, что в процессе электронно-лучевой плавки происходит рафинирование тантала от газов и металлических примесей. Содержание ниобия уменьшилась в процессе ЭЛП в 2...3 раза, а молибдена — в 5...6 раз, что обусловлено более высокой упругостью пара молибдена по отношению к ниобию. Так, например, при температуре расплава 3000 °С, согласно данным работы

**Таблица 2. Технологические параметры электронно-лучевой плавки лома тантала**

№ плавки	Доля используемой шихты, %			Скорость плавки, кг/ч	Мощность электронно-лучевого нагрева, кВт	Выход годного металла, %
	Тип 1	Тип 2	Тип 3			
328	100	0	0	25	120	93
330	50	0	50	35	210	90
334	50	0	50	17,5	220	92
338	0	100	0	14	190	92
384	0	100	0	17	300	87
407	100	0	0	26	120	94

Примечание. Площадь изложницы составляет 803 см<sup>2</sup>.

**Таблица 3. Химический состав слитков тантала**

№ плавки	Массовая доля элементов, %						
	Mo	Nb	Ti	Ni	Fe	O	N
328	0,021	0,065	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,038	0,0045
330	0,016	0,008	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,040	0,0072
334	0,011	0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,043	0,0050
338	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,002	0,0032
384	< 0,001	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,0031
407	0,023	0,073	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,041	0,0063

Примечания: 1. Содержание химических элементов определяли как среднее значение трех измерений. 2. Тантал — основа.

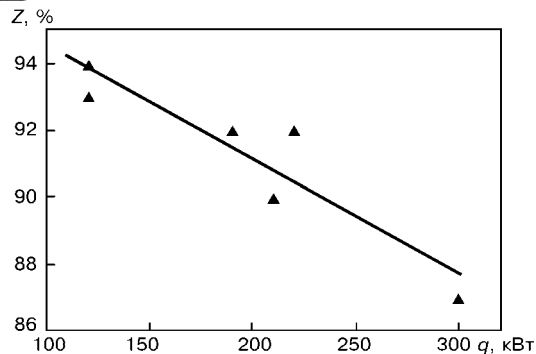


Рис. 2. Зависимость выхода годного металла  $Z$  от мощности  $q$  электронно-лучевого нагрева

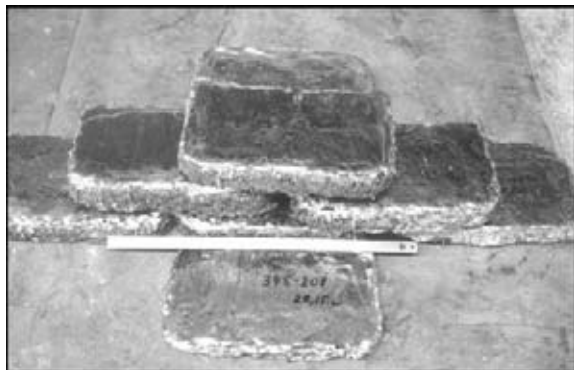


Рис. 3. Внешний вид слитков-слябов тантала с оплавленными большими гранями

[5], упругость пара ниобия составляет 16, а молибдена — 79 Па. Примесные элементы с более высокой упругостью пара (титан, никель, железо) испарялись до менее 0,005 %. Степень рафинирования тантала от кислорода составляла 20... 21, а от азота — 2... 4.

Следует отметить корреляцию между типом используемой шихты и содержанием примесных элементов в слитке-слябе. Слитки-слябы с наименьшим количеством вредных примесей получали при утилизации обрезки проволоки и ленты тантала.

Анализ результатов экспериментальных плавков (табл. 2) показал, что значительное влияние на выход годного металла имеет мощность электронно-лучевого нагрева расплава металла в изложнице (рис. 2).

Для устранения поверхностных дефектов поверхность слитков-слябов тантала оплавляли электронными лучами. Для этого путём сканирования электронного луча на поверхности слитка-сляба форми-

ровали узкую ванну жидкого металла на всю его ширину, затем посредством перемещения этой ванны вдоль слитка-сляба производили оплавление всей его поверхности.

Качество оплавленной поверхности танталовых слитков-слябов высокое (рис. 3). После механической обработки узких граней полученные слитки-слябы прокатывали на лист без промежуточной операции ковки.

Оптимизация технологических параметров ЭЛП лома тантала дала возможность повысить выход годного металла на плавку, что имеет большое значение ввиду высокой стоимости тантала. Выплавка плоских слитков-слябов с оплавленной поверхностью позволила уменьшить количество технологических операций при производстве титановой ленты.

### Выводы

1. Выполненные исследования показали перспективность применения технологии ЭЛП для утилизации лома тантала.

2. Создана технология получения качественных слитков-слябов при максимальном выходе годного металла.

3. Электронно-лучевое оплавление поверхности танталовых слитков-слябов позволяет осуществлять их прокатку в ленту без промежуточной операции ковки, что даст возможность снизить стоимость передела за счет сокращения количества технологических операций.

1. Киффер Р., Браун Х. Ванадий, ниобий, тантал. — М.: Металлургия, 1968. — 311 с.
2. Ниобий и тантал / А. Н. Зеликман, Б. Г. Коршунов, А. В. Елютин, А. М. Захаров. — М.: Металлургия, 1990. — 296 с.
3. Ахонин С. В. Эффективность рафинирования и потери на испарение при электронно-лучевой плавке тантала // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2000. — № 3. — С. 33–37.
4. Электронно-лучевая плавка / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 265 с.
5. Свойства неорганических соединений: Справ. / А. И. Ефимов, Л. П. Белорукова, И. В. Василькова, В. П. Чечев. — Л.: Химия, 1983. — 392 с.

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

Поступила 20.05.2005



## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ТИГЛЯ ПРИ ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ГАРНИСАЖНОЙ ПЛАВКЕ

М. Л. Жадкевич, В. В. Тэлин, С. М. Теслевич,  
А. Б. Лесной, В. Ф. Демченко, В. А. Шаповалов

Проведено численное моделирование процессов теплообмена, протекающих в условиях вакуумно-дуговой гарнисажной плавки. Проанализирована зависимость максимального слива жидкого металла от геометрических параметров тигля.

Numerical modeling of heat exchange processes proceeding under the conditions of vacuum-arc skull melting was made. Dependence of maximum pouring out of molten metal on geometric parameters of crucible was analyzed.

**Ключевые слова:** вакуумно-дуговая гарнисажная плавка; численное моделирование; тепловые процессы; оптимизация геометрии тигля

Благодаря высокому уровню коррозионной стойкости титан и его сплавы находят все большее применение в химическом машиностроении для изготовления оборудования, эксплуатируемого в агрессивных средах (насосы для перекачивания кислот, трубопроводы, вентили и т. п.). Широкое распространение изделий из титана сдерживается их высокой ценой, обусловленной использованием для получения титановых заготовок вакуумно-дугового, электронно-лучевого или индукционного способов плавки [1–3], а также сложностью технологического процесса и потерями металла в ходековки и прокатки. Более прогрессивным процессом производства изделий из титана является литье. Для изготовления титановых отливок наиболее широко применяются вакуумно-дуговые литейные печи. В их первых конструкциях тигель изготавливали из графита. Из-за взаимодействия тигля с расплавленным титаном в последнем растворяется значительное количество углерода (до 19 % [4]), в результате чего ухудшаются пластические свойства отливок.

Несмотря на предпринимаемые меры по защите расплава от взаимодействия с тиглем путем наведения титанового гарнисажа, избежать загрязнения расплава углеродом не удастся вследствие его диффузии через гарнисаж. Поэтому в современной конструкции литейной печи «Нева» (рис. 1), установленной на Запорожском титано-магнелиевом комбинате, используют неохлаждаемый титановый тигель, на стенках которого в процессе плавки образуется гарнисаж, препятствующий их проплавлению.

Процесс плавки осуществляется таким образом. Расходуемый электрод 2 устанавливают по оси тигля 3. Заливочную камеру 4 стыкуют с плавильной камерой 1, герметизируют и вакуумируют плавильное пространство до остаточного давления газов 13...15 Па. Затем касанием электрода о дно тигля поджигают дугу и, поднимая электрод, растягивают ее на 30...40 мм. Рабочий ток плавки составляет 10 кА, напряжение на дуге 30...33 В. После сплавления электрода и кратковременной выдержки (для дегазации) жидкий металл сливают в металлическую форму.

Одной из важных задач технологии вакуумно-дуговой тигельной плавки является обеспечение условий, при которых достигается максимальный слив жидкого металла. Особое значение при этом имеет выбор геометрических размеров тигля. Определим при фиксированном объеме полости тигля влияние отношения  $\theta$  диаметра тигля  $D$  к его высоте

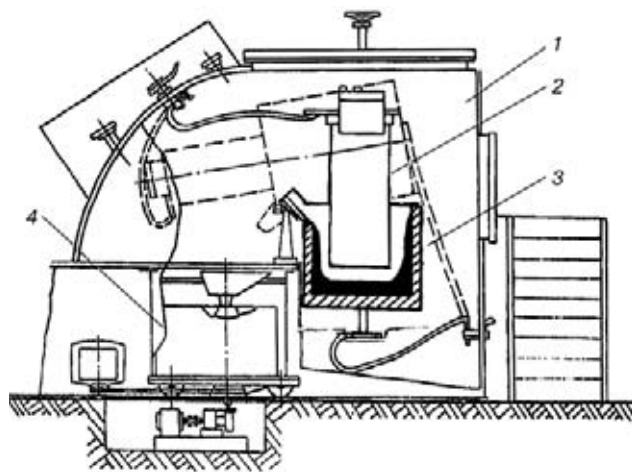


Рис. 1. Схема вакуумно-дуговой литейной печи (ВДЛП); обозначения поз. 1–4 см. в тексте

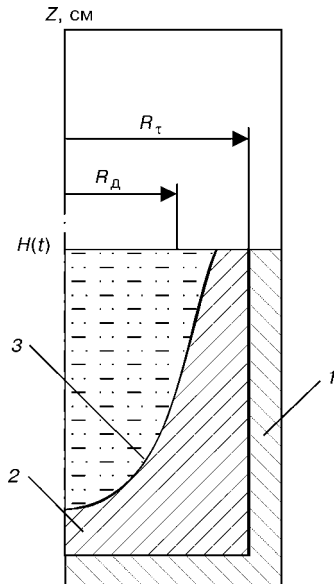


Рис. 2. Схема к математической модели вакуумно-дуговой гарнисажной плавки в цилиндрическом тигле: 1 — тигель; 2 — затвердевший гарнисаж; 3 — фронт затвердевания;  $R$  — внешний радиус тигля;  $R_\tau$  — внутренний радиус тигля;  $R_д$  — радиус теплового воздействия дуги под переплавляемым электродом;  $H(t)$  — уровень зеркала ванны

$H$  на массу жидкого металла, накапливаемого в тигле при его непрерывном заполнении жидким металлом к моменту завершения плавки.

Рассмотрим два крайних случая:  $\theta \gg 1$  и  $\theta \ll 1$ . В первом, из-за высоких потерь тепла через развитые донную и свободную поверхности объем жидкого металла будет минимальным. Аналогичный результат следует ожидать и для высокого тигля небольшого диаметра, поскольку обогрев головной части расплава окажется неэффективным, а потери тепла через боковую поверхность тигля будут значительными. Следовательно, существует такое значение  $\theta$ , при котором слив жидкого расплава будет максимальным, и оно зависит от способа и режима обогрева, конструкции тигля и других технологических параметров.

В условиях технологии вакуумно-дуговой гарнисажной плавки задачу оптимизации геометрических параметров тигля следует рассматривать с ограничениями, поскольку возможность варьирования диаметра тигля ограничена снизу диаметром расходоуемого электрода, причем таким образом, чтобы исключался переход дуги с поверхности зеркала ванны на стенку тигля.

В настоящей работе с помощью метода математического моделирования рассматривается задача оптимизации формы тигля при вакуумно-дуговой гарнисажной плавке.

При разработке математической модели предполагали осевую симметрию теплового поля, в связи с чем трехмерную задачу свели к решению двухмерной в цилиндрических координатах (рис. 2).

Процесс переноса тепла с учетом выделения скрытой теплоты кристаллизации описывается следующим уравнением кондуктивного переноса энергии в энтальпийной форме:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \text{div}(\lambda(T) \nabla T), \quad (1)$$

где  $W = \int_{T_0}^T c \rho dT + \chi \rho \eta(T)$  — энтальпия;  $c$  — удельная теплоемкость;  $\rho$  — плотность материала;  $T$  — температура;  $\chi$  — скрытая теплота кристаллизации;  $\eta(T)$  — объемная доля жидкой фазы в интервале температур кристаллизации;  $t$  — время;  $\lambda(T)$  — эффективный коэффициент теплопроводности, приближенно учитывающий конвективную составляющую теплового потока в жидком металле.

$$\lambda(T) = \begin{cases} k \lambda_L, & T > T_S; \\ \lambda_S, & T \leq T_S, \end{cases} \quad (2)$$

где  $r, z$  — цилиндрические координаты.

Уравнение (1) интегрируется в двухмерной области  $\Omega = \{0 < r < R, 0 < z < H(t)\}$ ,  $t \in [0, t^*]$  (рис. 2). Уровень зеркала ванны  $H(t)$  рассчитывается в соответствии с заданной производительностью накопления жидкого металла.

Сформулируем граничные условия для уравнения (1). На оси тигля выполняются следующие условия симметрии теплового поля:

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0. \quad (3)$$

На боковой и донной поверхности тигля учитывается радиационный теплообмен со стенками вакуумной камеры по закону Стефана-Больцмана:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \varepsilon \sigma_0 (T^4 - T_{в.к}^4), \quad (4)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \varepsilon \sigma_0 (T^4 - T_{в.к}^4), \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент черноты поверхности;  $\sigma_0$  — постоянная Стефана-Больцмана;  $T_{в.к}$  — температура стенок вакуумной камеры.

На зеркале металлической ванны граничные условия формулируются следующим образом. В приэлектродной области ( $r \leq R_д$ ) учитываем радиационный теплообмен с оплавленным торцом расходоуемого электрода, тепловое воздействие дуги, а также теплообмен с каплями переплавляемого металла; в области, ограниченной внутренней стенкой тигля ( $R_д \leq r \leq R_\tau$ ), — радиационный теплообмен со стенками плавильной камеры; в боковой стенке тигля ( $r > R_\tau$ ) принимаем, что тепловой поток в вертикальном направлении отсутствует:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H(t)} = \begin{cases} \varepsilon \sigma_0 (T^4 - T_0^4) + q_d(r) + m(r) c \rho (T - T_0) v_z(r, H(t)), & r \leq R_д; \\ \varepsilon \sigma_0 (T^4 - T_{в.к}^4), & R_д \leq r \leq R_\tau; \\ 0, & r > R_\tau, \end{cases} \quad (6)$$

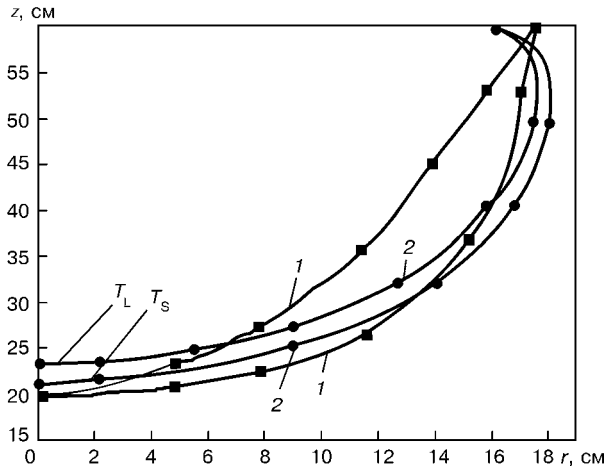


Рис. 3. Расчетная и экспериментальная конфигурация металлической ванны при вакуумно-дуговой гарнисажной плавке: 1 — экспериментальные; 2 — расчетные данные

где  $T_0$  — температура жидкого металла на оплавленном торце электрода;  $q_d(r)$  — плотность распределения тепловой мощности дуги;  $m(r)$  — поверхностная плотность поступления капель на зеркало ванны;  $v_z$  — скорость перемещения зеркала ванны.

В начальный момент времени  $t = 0$  предполагается существование затравочного объема металла с температурой  $T(0) = T_{в.к}$  и высотой  $H(0)$ , соответствующей толщине дна тигля.

Для численной реализации модели (1)–(6) использовали схему сквозного счета решения задачи типа Стефана [5], реализованную методом конечных разностей [6]. Расчеты проводили для титанового сплава ВТ1Л. Значения теплофизических характеристик титанового сплава [4] и типовые технологические параметры плавки, входящие в математическое описание модели ВДЛП, приняты такими:  $T_L = 1650^\circ\text{C}$ ,  $T_S = 1590^\circ\text{C}$ ;  $c_L = 0,5 \text{ Дж}/(\text{г}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $c_S = 0,7 \text{ Дж}/(\text{г}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $\chi = 436 \text{ Дж}/\text{г}$ ;  $\lambda_L = 0,3 \text{ Вт}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$ ,  $\lambda_S = 0,2 \text{ Вт}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$ ;  $\rho_L = 4,2 \text{ г}/\text{см}^3$ ,  $\rho_S = 4,5 \text{ г}/\text{см}^3$ ;  $R_d = 28 \text{ см}$ ;  $R_T = 49 \text{ см}$ ;  $T_0 = T_L + 50^\circ\text{C}$ ;  $T_{в.к} = 20^\circ\text{C}$ ;  $\epsilon = 0,6$ ; КПД дуги = 0,46; общая масса сплавления электрода 387 кг; толщина стенки тигля 4,5 см; толщина днища тигля 10 см;  $L, S$  — индексы, соответствующие жидкой и твердой фазам. Мощность источника нагрева равномерно распределялась на свободной поверхности ванны в пределах радиуса электрода.

Для верификации математической модели использовали экспериментальные данные о форме жидкометаллической ванны, полученные при плавке с характерными технологическими параметрами. На рис. 3 показаны экспериментальная форма ванны после слива жидкого металла из полости тигля, а также расчетные изолинии температур ликвидус и солидус. Приведенные графики свидетельствуют о достаточно удовлетворительном совпадении результатов расчетов с опытными данными.

Анализ динамики формирования жидкометаллической ванны в процессе плавки показал, что из двух факторов (скорость заполнения тигля расплавом и скорость затвердевания), от которых зависит количество жидкого металла в тигле, определяющее

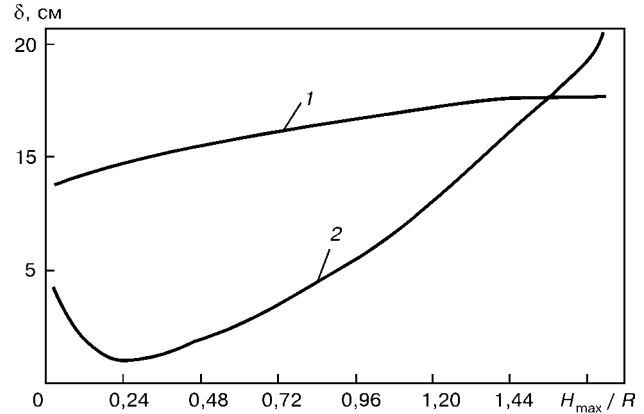


Рис. 4. Изменение минимальной толщины  $\delta$  гарнисажа по ходу плавки в осевом (1) и радиальном (2) направлениях;  $H_{\max}$  — конечная высота переплавленного металла в тигле

значение имеет скорость заполнения. В ходе плавки толщина гарнисажа вблизи боковой стенки остается практически постоянной (рис. 4), в то время как в осевой части тигля зафиксировано колебание толщины гарнисажа.

На начальной стадии заполнения тигля происходит подплавление донной части гарнисажа, продолжающееся до достижения текущей высоты жидкого металла  $H(t) \sim 0,24R$ . При дальнейшем повышении уровня зеркала ванны теплоотвод с донной поверхности тигля доминирует над подводом тепла от источника дугового нагрева к межфазной границе, вследствие чего оплавление прекращается, и толщина гарнисажа увеличивается.

На рис. 5 представлены зависимости тепловых потерь с зеркала ванны, боковой и донной поверхностей тигля. На начальной стадии плавки максимальные тепловые потери характерны для зеркала ванны, минимальные — для боковой поверхности тигля.

По мере накопления жидкого металла в объеме тигля возрастают тепловые потери с боковой поверхности. При  $H(t) \sim 0,58R$  теплоотвод в стенку тигля начинает преобладать над теплоотводом с донной поверхности, а при  $H(t) \sim 0,94R$  — и над теплоотводом с поверхности зеркала ванны. К концу плавки тепловые потери с боковой поверхности тигля составляют 60 % суммарных тепловых. В связи с этим

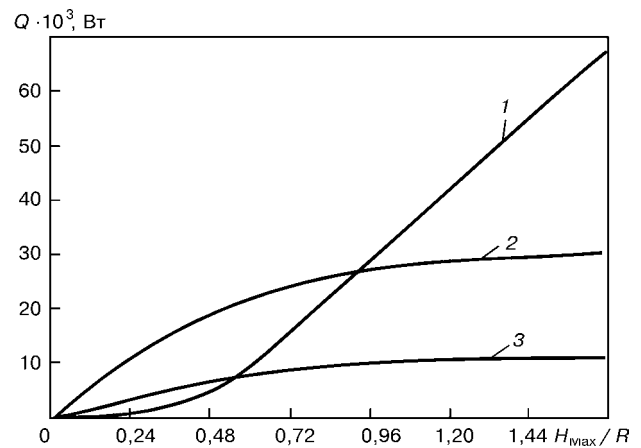


Рис. 5. Тепловые потери  $Q$  с боковой поверхности (1), зеркала ванны (2) и дна тигля (3)

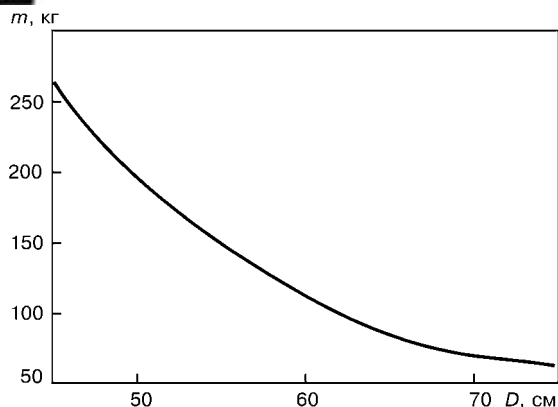


Рис. 6. Зависимость массы  $m$  жидкого металла от диаметра  $D$  тигля

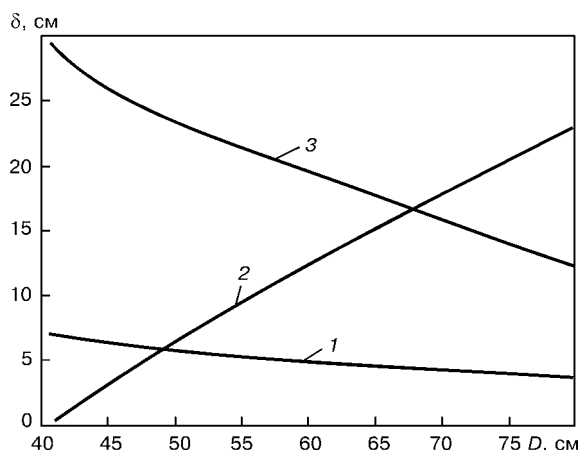


Рис. 7. Минимальная толщина гарнисажа на донной (1) и боковой (2) стенках тигля в зависимости от диаметра тигля, а также на дне тигля к концу плавки (3)

представляет интерес оценить энергетическую эффективность процесса ВДЛП в зависимости от геометрии тигля.

На рис. 6 показана зависимость накопленной массы жидкого металла на конечной стадии плавки от диаметра тигля при постоянном объеме переплавляемого материала, мощности и производительности плавки. Общая тенденция такова: с уменьшением диаметра тигля масса жидкого металла к моменту слива увеличивается.

Данный результат обуславливается несколькими факторами: прежде всего довольно высокой производительностью плавки и относительно низкой теплопроводностью титана в затвердевшем состо-

янии, а также тем обстоятельством, что с уменьшением диаметра тигля возрастает коэффициент его заполнения ( $R_d/R_T$ ), вследствие чего снижаются тепловые потери с поверхности зеркала ванны и повышается перегрев жидкого металла над температурой ликвидус. Дальнейшее уменьшение диаметра тигля приводит к подплавлению боковой стенки. Таким образом, при оптимизации геометрических размеров тигля потенциально возможный экстремум не достигается, поскольку вступает в силу ограничение на диаметр тигля, связанное с проплавлением боковой стенки.

Из рис. 7 следует, что для донной поверхности близкая к критической степень оплавления не зафиксирована, в то время как минимальная толщина боковой стенки тигля при диаметрах менее 45 см значительно снижается, а это может привести к прожогу.

### Выводы

1. Показано, что тепловые потери с боковой поверхности тигля в условиях вакуумной дуговой гарнисажной плавки могут достигать 60 % суммарных. Поэтому минимизация высоты тигля способствует повышению теплового КПД процесса.

2. Установлено, что в условиях нестационарного процесса накопления жидкого металла его максимальный слив достигается при внутреннем диаметре тигля, равном 0,65 высоты.

1. Плавка и литье титановых сплавов / А. Л. Андреев, Н. Ф. Аношкин, К. М. Борзцовская и др. — М.: Металлургия, 1978. — 383 с.
2. Электронно-лучевая плавка / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 265 с.
3. Калинюк А. Н. Развитие электронно-лучевой плавки титана и его сплавов // Спец. электрометаллургия вчера, сегодня, завтра: Материалы междунар. науч.-техн. конф. (Киев, 8–9 окт. 2002 г.). — Киев: Политехника, 2002. — С. 102–108.
4. Титановые сплавы. Производство фасонных отливок из титановых сплавов / Е. Л. Бибииков, С. Г. Глазунов, А. А. Неуструев и др. — М.: Металлургия, 1983. — 296 с.
5. Николаев Е. С., Самарский А. А. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1978. — 537 с.
6. Самарский А. А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1977. — 656 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
КП «Запорожский титано-магниевого комбинат»  
Поступила 27.05.2005



УДК 621.791.753.042.2.052:541.11:669.788

## ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ РАСПЛАВОВ СМЕСЕЙ ФТОРИДОВ И ХЛОРИДОВ

В. Е. Крицкий, Б. П. Бурылев, Е. Б. Крицкая

Получена зависимость между значениями удельной электропроводности фторидов и соответствующих хлоридов, из которой возможно вычисление неизвестных показателей электропроводности фторидов металлов группы железа. Предложено уравнение, описывающее концентрационную зависимость удельной электропроводности щелочноземельных фторидно-хлоридных расплавов смеси. Возможно прогнозирование зависимостей электропроводности от состава для систем  $MnF_2-MnCl_2$  и  $CoP_2-CoCl_2$  и т. д.

Relation was obtained between the values of specific electric conductivity of fluorides and appropriate chlorides from which the deduction of unknown characteristics of electric conductivity of fluorides of metals of iron group is possible. Equation is offered, describing the concentration dependence of specific electric conductivity of alkali-earth fluoride-chloride melts of mixtures. Prediction of dependencies of electric conductivity on composition for systems  $MnF_2-MnCl_2$  and  $CoP_2-CoCl_2$ , etc. is possible.

**Ключевые слова:** электропроводность расплавов; фториды и хлориды щелочноземельных металлов; зависимость электропроводности от состава расплава

Галогенидные системы (фторидные и хлоридные) вместе с оксидными расплавами составляют основу шлаковых расплавов при сварке [1, 2], образующихся при расплавлении шихты самозащитных порошковых проволок и электродных покрытий [3]. Экспериментальные данные об удельной электропроводности для фторидов, а также для хлоридов металлов группы железа [4] отсутствуют. Между тем, как следует из данных работы [4], уровень электропроводности фторида марганца выше, чем у фторидов щелочноземельных металлов [5]. Поэтому создание флюсовых композиций для материалов сварочного производства и спецметаллургии с высокими показателями электропроводности является актуальной задачей. Решение ее заключается в определении неизвестных значений электропроводности индивидуальных галогенидов, а также их бинарных смесей.

Целью работы является установление взаимосвязи между двумя классами галогенидов для дальнейшего прогнозирования их свойств. Для этого использовали метод, приведенный в работе [6].

При постоянной температуре 1773 К удельная электропроводность фторидов щелочноземельных металлов в зависимости от удельной электропроводности хлоридов щелочноземельных металлов может быть описана уравнением прямой [5]. Методом на-

именных квадратов для доверительной вероятности  $p = 0,95$  получим

$$\chi_{MF_2} = 9,0 + 1,634 \chi_{MCl_2} \quad [Om^{-1} \cdot m^{-1}], \quad (1)$$

что следует из рис. 1.

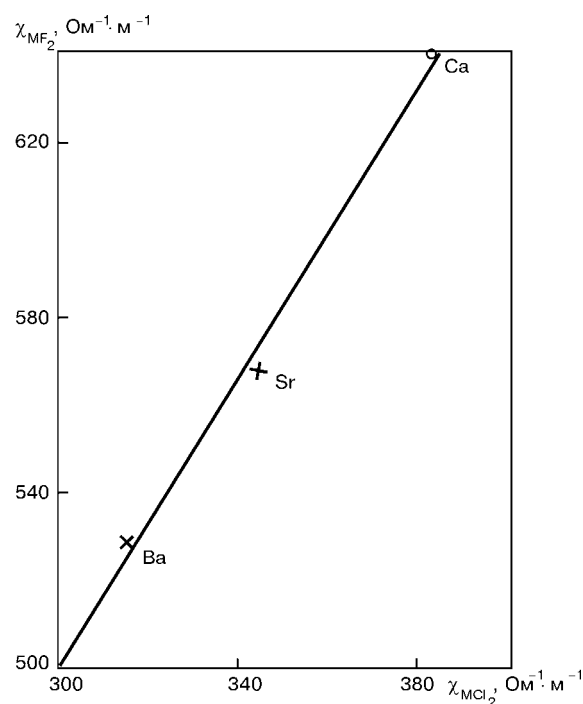


Рис. 1. Зависимость между значениями электропроводности фторидов и хлоридов щелочноземельных металлов при 1773 К

© В. Е. КРИЦКИЙ, Б. П. БУРЫЛЕВ, Е. Б. КРИЦКАЯ, 2005

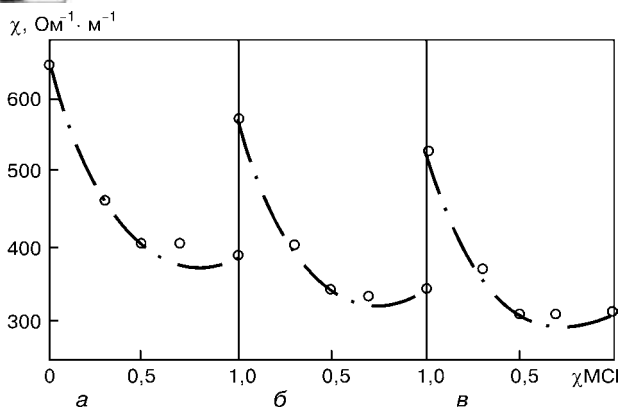


Рис. 2. Зависимость уровня электропроводности в бинарных системах  $\text{MF}_2\text{-MCl}_2$  от концентрации хлорида для  $M = \text{Ca}$  (а),  $\text{Sr}$  (б) и  $\text{Ba}$  (в) при 1773 К; линиями обозначены рассчитанные по уравнению (3), кружками — экспериментальные [5] данные

Проверку данного соотношения выполним путем его сравнения с экспериментальными данными для фторида марганца, приведенными в справочнике [4]. По интерполяционному уравнению для температурной зависимости удельной электропроводности хлорида марганца находим при 1773 К  $\chi_{\text{MnCl}_2} = 3950 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ . Из уравнения (1) определим  $\chi_{\text{MnF}_2} = 654 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ . Экстраполяция справочных данных [4] к 1773 К по линейному уравнению

$$\chi_{\text{MnF}_2} = 0,4T$$

приводит к  $\chi_{\text{MnF}_2} = 710 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ . Если учесть весьма далекую экстраполяцию для фторида марганца (от 1300 до 1773 К), а тем более для хлорида марганца (от 1130 до 1773 К), то следует признать погрешность в 8 % приемлемой для оценки результатов, отсутствующих в настоящее время.

Для хлорида железа [7]

$$\chi_{\text{FeCl}_2} = -41 + 0,20T,$$

откуда для 1773 К  $\chi_{\text{FeCl}_2} = 314 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ . Из уравнения (1) находим для той же температуры удельную электропроводность фторида железа  $\chi_{\text{FeF}_2} = 522 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ , что приближается к значению электропроводности фторида бария.

Как следует из этих результатов, значения электропроводности фторидов металлов группы железа близки к таковым фторидов щелочноземельных металлов, а для фторида марганца даже превышают их. Таким образом, использование хлоридов и фторидов металлов группы железа в шихте порошковой проволоки и электродных покрытий весьма перспективно.

Для электропроводности расплавленных бинарных солей используют уравнение Б. Ф. Маркова [8]

$$\lambda_m = X_1^2 \lambda_1 + X_2^2 \lambda_2 + 2X_1 X_2 \lambda_1,$$

где  $\lambda_m$  — эквивалентная электропроводность смеси солей;  $\lambda_1, \lambda_2$  — эквивалентные электропроводности чистых компонентов ( $\lambda_1 < \lambda_2$ );  $X_1, X_2$  — мольные доли солей.

Отклонения от уравнения возрастают по мере усложнения фазовой диаграммы, т. е. по мере увеличения взаимодействия в бинарной системе.

Предпринята попытка получить уравнение для расчета с учетом отклонения от аддитивности в связи с химическим взаимодействием. Согласно эмпирическому правилу [9],

$$\chi^n \eta = \text{const} = C, \quad (2)$$

где  $\eta$  — коэффициент вязкости;  $n$  — константа, (чаще  $n > 1$ ).

В работах [10, 11] для концентрационной зависимости коэффициента вязкости регулярного раствора получено уравнение

$$\eta = (\eta_1 X_1 + \eta_2 X_2) (1 - X_1 X_2 2Q/RT),$$

где  $\eta, \eta_1, \eta_2$  — коэффициенты вязкости соответственно смеси, чистых одного и двух компонентов;  $Q$  — энергия взаимообмена;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура.

В предположении, что в выражении (2)  $n$  не сильно отличается от единицы и константа  $C$  не изменяется с варьированием состава, определяем, что

$$\frac{1}{\chi} = \left( \frac{1}{\chi_1} X_1 + \frac{1}{\chi_2} X_2 \right) (1 - X_1 X_2 2Q/RT). \quad (3)$$

Уровни энергии взаимообмена установлены для систем  $\text{BaF}_2\text{-BaCl}_2, \text{SrF}_2\text{-SrCl}_2$  и  $\text{CaF}_2\text{-CaCl}_2$  из экспериментальных данных [7] для эквимолекулярного состава и достигают соответственно  $-8000, -7700, -5900$  Дж/моль. Они согласуются с типом диаграммы плавкости [12] систем  $\text{MF}_2\text{-MCl}_2$  ( $M = \text{Ba}, \text{Sr}, \text{Ca}$ ). Сравнение рассчитанных по уравнению (3) и экспериментальных [5] данных приведено на рис. 2.

Измерения давления пара в системах  $\text{MnF}_2\text{-MnCl}_2$  и  $\text{CoF}_2\text{-CoCl}_2$  свидетельствуют об отрицательных отклонениях от эталонных, поэтому и для них вероятны экстремальные зависимости удельной электропроводности от концентрации расплава. Таким образом, уравнение (3) может быть использовано для прогнозирования концентрационной зависимости электропроводности расплавов галогенидов, применяемых в сварочном производстве [13].

### Выводы

1. Определена зависимость между значениями удельной электропроводности фторидов и хлоридов щелочноземельных металлов.
2. Вычислены значения электропроводности фторидов марганца и железа. Первая величина в пределах 8 % погрешности согласуется с имеющимися литературными данными.
3. Выведено уравнение для концентрационной зависимости электропроводности, проверенное на системах  $\text{CaF}_2\text{-CaCl}_2, \text{SrF}_2\text{-SrCl}_2$  и  $\text{BaF}_2\text{-BaCl}_2$ , а также возможных расчетов для фторидно-хлоридных систем марганца и металлов группы железа.





1. Подгаецкий В. В., Кузьменко В. Г. Сварочные шлаки: Свароч. пособие. — Киев: Наук. думка, 1988. — 252 с.
2. Копеев Б. В. Применение нетрадиционных материалов при дуговой сварке в защитных газах и под флюсом // Свароч. пр-во. — 1995. — № 3. — С. 30–31.
3. А. с. 1268350 СССР, МПК В23К3Б/365. Состав электродного покрытия / А. И. Кретов, В. Г. Хохлов, Л. П. Мойсов и др. — Оpubл. 07.11.86; Бюл. № 41.
4. Справочник по расплавленным солям. Т. 1. / Под ред. А. Г. Морачевского. — Л.: Химия, 1971. — 168 с.
5. Удельная электропроводность расплавленных солей  $\text{CaF}_2\text{-CaCl}_2$ ,  $\text{SrF}_2\text{-SrCl}_2$  и  $\text{BaF}_2\text{-BaCl}_2$  / Б. М. Воронин, В. Д. Присяжный, К. К. Хижняк и др. // Укр. хим. журн. — 1987. — 53, № 6. — С. 603–607.
6. Расчет давления насыщенного пара фторидов по данным о давлении насыщенного пара хлоридов / Л. П. Мойсов, И. А. Гаранина, Б. П. Бурылев и др. // Материалы Всесоюз. семинара в области теории и эксперимента бинарных и многокомпонентных смесей. — Краснодар: Политех. ин-т, 1976. — С. 65–71.
7. Редькин А. А. Физико-химические свойства растворов ди- и трихлорида железа в расплавленных хлоридах щелочных металлов: Автореф. ... дис. канд. хим. наук. — Свердловск, 1988. — 19 с.
8. Антипин Л. Н., Важенин С. Ф. Электрохимия расплавленных солей. — М.: Metallurgizdat, 1964. — 355 с.
9. Есин О. А., Гельд П. В. Физическая химия пирометаллургических процессов. — М.: Metallurgiya, 1966. — Ч. 2. — 703 с.
10. Бурылев Б. П. К расчету вязкости металлических сплавов // Журн. физич. химии. — 1967. — 41, № 1. — С. 104–106.
11. Бурылев Б. П., Лантев Д. М., Мойсов Л. П. К расчету вязкости шлаковых расплавов // Свароч. пр-во. — 1999. — № 10. — С. 8–11.
12. Справочник по плавкости систем из безводных неорганических солей: В 2 т. Т. 1. Двойные системы / Под ред. Н. К. Воскресенской. — М.; Л.: Изд-во АН СССР. — 1961. — 845 с.
13. Мойсов Л. П., Бурылева Н. Б., Кретов А. И. Электропроводность расплавленных двухвалентных фторидов и хлоридов и их смесей // Физико-химические исследования металлургических процессов: Межвуз. сб. науч. тр. — Свердловск, 1990. — Вып. 18. — С. 81–84.

ООО «Интер-Ойл Продукт», Краснодар, РФ

Поступила 08.02.2005

## ПАМЯТИ В. И. КАШИНА

21 мая на 79 году жизни скоропостижно скончался Виталий Иванович Кашин — видный ученый-металлург, заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор.

Большой жизненный путь Виталия Ивановича отмечен важными вехами. В 1943 г. он шестнадцатилетним юношей ушел добровольцем на фронт. Служил на Краснознаменном Балтийском флоте минером на тральщике. За мужество и отвагу, проявленные в годы Великой Отечественной войны, молодой моряк-минер В. И. Кашин был награжден медалью «Адмирал Нахимов», а впоследствии — орденом Отечественной войны.

В 1950 г. В.И. Кашин поступил в Московский институт стали, по окончании которого в 1955 г. направлен в аспирантуру Института металлургии им. А. А. Байкова АН СССР в лабораторию академика А. М. Самарина, где прошел путь от аспиранта до заведующего лабораторией, заместителя директора института.

С мая 1970 года и до последних своих дней в течение более тридцати пяти лет В. И. Кашин возглавлял лабораторию «Физикохимия металлических расплавов», основанную его учителем академиком А. М. Самариним в 1952 г. и носящую его имя.

За эти годы В. И. Кашин провел большой объем научных исследований в области теории и практики вакуумной индукционной плавки, вакуумно-дугового переплава, электрошлакового переплава различных марок стали и сплавов, которые посвящены изучению физико-химических закономерностей рафинирования стали и сплавов, взаимодействию плазмы с металлическим расплавом, распределению мощности дугового разряда и другим важным вопросам специальной металлургии.

В. И. Кашин — известный специалист в области физикохимии металлических и оксидных расплавов, автор большого количества «пионерских» работ по исследованию термодинамических свойств растворов кислорода, углерода, серы, фосфора, азота, водорода в расплавах на основе железа, никеля, кобальта, марганца, хрома. Под его руководством и при непосредственном участии проводились исследования по разработке новых технологических процессов выплавки стали, сплавов, тугоплавких металлов и марганцевых ферросплавов.

С 1985 г. и до последних дней В. И. Кашин совмещал научную работу и преподавательскую деятельность. Будучи профессором Московского физико-технического института он создал и прочитал новый для института курс «Физико-химические основы металлургических процессов».

В. И. Кашин большое внимание уделял воспитанию научных кадров. Под его руководством защищены многие кандидатские диссертации. Он автор многочисленных научных публикаций, авторских свидетельств и патентов.

Трудовые достижения В. И. Кашина отмечены орденом «Знак Почета» и медалью «За трудовую доблесть». За комплекс научных исследований и технологических разработок он удостоен премий Совета Министров СССР, Правительства Российской Федерации и Президиума Академии наук СССР.

В. И. Кашин был заместителем председателя Научного совета РАН «Физико-химические основы металлургических процессов», членом Научного совета РАН «Новые процессы получения и обработки металлических материалов», членом двух специализированных Советов по присуждению ученых степеней доктора наук, а также редакционных коллегий ряда отечественных и зарубежных научных журналов.

Светлая память о Виталии Ивановиче Кашине навсегда сохранится в сердцах тех, кто его знал, работал вместе с ним, прошел его научную школу.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины

Редколлегия журнала





УДК 669.187.2.001.7

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ УНИЧТОЖЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ МЕДИЦИНСКИХ И ДРУГИХ ОПАСНЫХ ОТХОДОВ. Часть I

**Б. Е. Патон, А. В. Чернец, Г. С. Маринский,  
В. Н. Коржик, В. С. Петров**

Проанализированы проблемы, связанные с обращением и переработкой медицинских и других опасных отходов. Рассмотрены существующие пути их решения, наиболее эффективным из которых представляется применение плазменных процессов. Примеры использования различных технологий и оборудования плазменной переработки отходов свидетельствуют об их существенных преимуществах по сравнению с каноническими, в частности традиционным сжиганием. Показано, что новые процессы позволяют добиться комплексного (как с точки зрения высокой эффективности, так и экологической безопасности) решения проблем переработки/уничтожения отходов и могут быть рекомендованы в качестве одного из наиболее перспективных альтернативных путей совершенствования и развития технологий переработки медицинских и других опасных отходов.

Problems connected with disposal and recycling of medical and other dangerous waste are analyzed. Existing ways of their solution, among which the application of plasma technologies is most effective, are considered. Examples of application of different technologies and equipment of plasma recycling of waste prove their significant advantages as compared with canonic technologies, in particular using combustion. It is shown that the new processes allow complex solution of the problems of recycling and disposal of waste (both from the point of view of high efficiency and also ecological safety) and can be recommended as one of the most promising alternative ways of improvement and development of technologies of recycling of medical and other hazardous waste.

**Ключевые слова:** плазменная переработка отходов; медицинские отходы; плазматрон; утилизация; пиролиз; синтез-газ

### **Медицинские отходы. Современное состояние, технологии переработки, проблемы и возможные решения**

Проблема эффективной переработки отходов приобретает все большее значение. Утилизация отходов всех категорий (от промышленных до бытовых) требует постоянного системного подхода. Свободного места на свалках остается все меньше, при этом захоронение далеко не всех типов отходов может быть экологически безопасно.

В соответствии с общепринятым понятием, опасными являются такие отходы (твердые или смесь), которые ввиду своей природы, концентрации химических или инфицирующих компонентов, а также физических факторов могут быть причиной повышения показателей смертности или увеличения час-

тоты серьезных и необратимых заболеваний, а также болезней, приводящих к инвалидности; в случае неправильной обработки, хранения, транспортировки, удаления, переработки создавать в настоящее время или в будущем потенциальную опасность для здоровья человека или для окружающей среды [1].

Одними из наиболее опасных являются отходы, производимые учреждениями здравоохранения. Так, Базельская конвенция 1992 г., установившая 45 видов опасных отходов, открывает их список именно клиническими отходами [2].

Проблема уничтожения медицинских отходов чрезвычайно актуальна сегодня для всех стран мира. В 1979 г. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ), учитывая очень высокую опасность этой категории отходов, указала на необходимость создания специальных служб по их переработке.

Каждый год общее количество образующихся медицинских отходов в США составляет 3,2 млн т;

© Б. Е. ПАТОН, А. В. ЧЕРНЕЦ, Г. С. МАРИНСКИЙ, В. Н. КОРЖИК, В. С. ПЕТРОВ, 2005

во Франции — примерно 600 тыс. т, причем около половины из них составляют инфицированные отходы; в Китае — 650 тыс. т; в России — около 600... 1000 тыс. т [3–5].

При этом следует отметить и тот факт, что количество медицинских отходов имеет устойчивую тенденцию к интенсивному росту во всем мире.

Накопление отходов здравоохранения (килограмм на койку в сутки) в различных регионах мира, по данным ВОЗ, следующее [6–8]:

Северная Америка — 7... 10;

Латинская Америка — 3;

Западная Европа — 3... 6;

Восточная Европа — 1,4... 2,0;

Средний Восток — 1,3... 3,0;

Восточная Азия (развитые страны) — 2,5... 4,0;

Восточная Азия (развивающиеся страны) — 1,8... 2,2.

В настоящее время существует весьма значительное количество разнообразных классификаций медицинских отходов, которые можно разделить на следующие основные группы [1, 9].

**А** — неопасные: не имеющие контакта с биологическими жидкостями пациентов, инфекционными больными; нетоксичные отходы; пищевые отходы всех отделений, кроме инфекционных; неинфицированная бумага; строительный мусор и т. д.;

**Б** — опасные (рискованные): потенциально инфицированные отходы (материалы и инструменты, загрязненные биологическими жидкостями, в том числе кровью, выделениями пациентов, патологоанатомические отходы, органические операционные, отходы инфекционных отделений и микробиологических лабораторий, работающих с 3- и 4-м классами патогенности, биологические отходы вивариев);

**В** — чрезвычайно опасные: все материалы, контактирующие с больными (носителями особо опасных инфекций), отходы микробиологических лабораторий, работающих с 1- и 2-м классами патогенности, фтизиатрических, микологических больниц, от пациентов с анаэробной инфекцией;

**Г** — по составу близкие к промышленным: просроченные лекарственные средства, цитостатики и другие химические препараты, ртутьсодержащие предметы и оборудование;

**Д** — радиоактивные.

По принятой на Западе классификации инфекционные отходы разделяют на десять основных категорий [10, 11].

*Культуры и запасы* инфицированных веществ и сопутствующие биопрепараты.

*Анатомические отходы* (или человеческие патологические отходы). Ткани, органы и части тела, включая жидкости организма, удаленные в процессе хирургии, аутопсии или других медицинских процедур.

*Человеческая кровь, продукты крови, и другие физические жидкости.* Выброшенные человеческая кровь, компоненты или продукты крови; предметы,

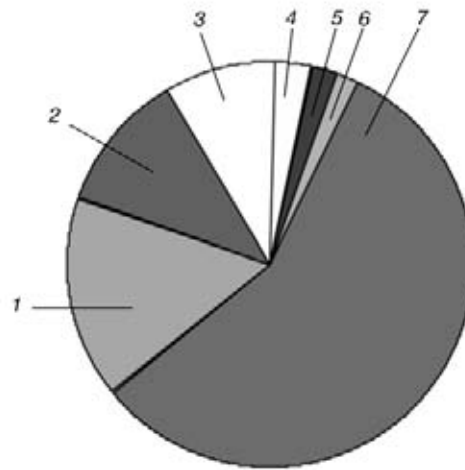


Рис. 1. Среднестатистическая структура отходов, образующихся в лечебных учреждениях [10]: 1 — медицинские, т. е. могущие служить источником инфекционных болезней; 2 — гофрированный картон; 3 — отходы пациентов; 4 — бумага; 5 — опасные, т. е. могущие привести к смертельному исходу или серьезным болезням; 6 — другие; 7 — общие твердые

насыщенные кровью, продуктами крови, жидкостями организма или затвердевшие с засохшей кровью.

*Иглы, скальпели.* Колющие, включая шприцы, пипетки, лезвия скальпелей, пробирки и иглы; битое или небитое стекло.

*Отходы животных.* Выброшенные материалы, включая скелеты, части тела, жидкости организма, кровь или подстилки животных, подвергавшихся воздействию инфекционных веществ.

*Инфекционные отходы.* Выброшенные материалы, загрязненные кровью, выделениями людей, изолированных для предохранения других от инфекционных болезней.

*Загрязненное медицинское оборудование,* контактировавшее с инфицированными веществами.

*Операционные (хирургические) отходы.* Выброшенные материалы, включая загрязненные перевязочные материалы, губки, защитные пленки, халаты, перчатки и т. д.

*Лабораторные отходы,* которые были в контакте с инфекционными веществами, такими как предметные стекла и покрытия.

*Отходы диализа.* Отбросы и оборудование, которые были в контакте с кровью пациентов, подвергавшихся диализу.

Потенциальными источниками отходов в здравоохранении могут являться учреждения лечебно-профилактические, скорой и неотложной медицинской помощи, судебно-медицинской экспертизы, санитарно-профилактические, станции переливания крови, микробиологические, биохимические и физические лаборатории, аптеки и медицинские училища, научно-исследовательские институты медицинского профиля, прочие медицинские учреждения.

Среднестатистическая структура отходов учреждений здравоохранения представлена на рис. 1.

Обращение с отходами учреждений здравоохранения из-за их специфического характера требует строгого системного подхода и должно предусматривать сбор, упаковку, хранение, транспортировку, переработку и удаление посредством таких способов, которые на всех этапах позволяют свести к минимуму опасность для здоровья персонала, занимающегося переработкой, населения в целом и окружающей среды.

Способы обработки отходов здравоохранения в соответствии с данными работы [1], можно разделить на две основные группы: ликвидационные (захоронение, обеззараживание химическими или физическими способами и складирование на полигонах твердых бытовых отходов (ТБО), сжигание с последующим захоронением остатков от сжигания и др.) и утилизационные, предполагающие использование повторное или в качестве вторичного сырья.

С учетом высокой опасности медицинских отходов ликвидационные способы более предпочтительны. При этом существует два основных требования, без учета которых не разрабатывается ни одна система обезвреживания и уничтожения отходов: невозможность повторного использования отходов и надежная их дезинфекция. Выполнение первого предполагает изменение внешнего вида того или иного отработанного материала, подлежащего уничтожению. Особую проблему здесь представляют такие предметы, как иглы, скальпели, предметные стекла, лабораторная посуда — чрезвычайно опасные в плане травматизма и распространения инфекции. Поэтому для этой категории отходов важно не только изменение внешнего вида, но и полное уничтожение с тем, чтобы они перестали быть опасными для окружающих.

Специфика медицинских отходов предопределяет невозможность применения таких общих правил работы с ними, как отдельный сбор различных видов отходов, предварительную сортировку, отбор части отходов. Кроме того, категорически запрещается смешивать медицинские отходы с бытовыми и захоранивать их на городских свалках.

Специфические свойства медицинских отходов формируют такие обязательные требования к технологиям их обработки, как дезинфекция; обеззараживание; минимизация объема и массы продуктов переработки; полная автоматизация и механизация переработки; защита обслуживающего персонала, гражданского населения близлежащих территорий и окружающей среды. Все эти требования приближают технологию переработки медицинских отходов к переработке органических промышленных и токсичных отходов.

Наиболее распространенным способом переработки (уничтожения) медицинских отходов в течение уже многих десятилетий является сжигание в мусоросжигательных печах с последующим захоронением остатков на специальных полигонах. Уровень применения таких технологий в разных странах различен. Так, из общих объемов бытового му-

сора доля сжигания в таких странах, как Австрия, Италия, Франция, Германия, колеблется от 20 до 40 %; Бельгия, Швеция — 48... 50 %; Япония — 70 %; Дания, Швейцария 80 %; Англия и США — 10 % [11].

Однако установки для огневого сжигания отходов, столь популярные до последнего времени в системах санитарной очистки западных стран, начинают пользоваться все меньшим спросом в мире. Применение этих установок приводит к значительному загрязнению воздушного пространства, поскольку они — главный источник диоксинов в окружающей среде, кроме того, производят золу, являющуюся потенциально опасной [1, 10, 12–17]. А самое главное, сжигание не гарантирует стопроцентного уничтожения токсичных составляющих отходов, имеются также очень серьезные ограничения, связанные с гетерогенностью отходов по составу.

В 1997 г. Агентство по охране окружающей среды (АООС) предложило новые инструкции для строящихся и существующих установок сжигания медицинских отходов. Требования АООС в значительной степени увеличивают стоимость этого процесса. Кроме того, работники предприятий, обслуживающих здравоохранение, исследователи, да и сами медики ищут альтернативные способы уничтожения отходов здравоохранения, а также новые пути избавления от скапливающихся отходов. При этом применяют самые современные технологии их сбора и удаления, что, с одной стороны, позволяет качественно улучшать существующие способы, а с другой, — создавать совершенно новые технологические цепочки.

В результате возрастающего внимания со стороны как государственных, так и негосударственных организаций к комплексному решению проблемы переработки медицинских отходов, усложнились процедуры получения разрешений на установку систем, обезвреживающих отходы. Увеличились цены на такие системы, затруднен вывоз отходов для уничтожения на определенных предприятиях и участились отказы органов санитарного контроля в выдаче разрешений на хранение и переработку любых видов медицинских отходов. Поэтому разработка альтернативных сжиганию технологий переработки отходов приобретает все большее значение.

Среди несжигающих процессов переработки отходов можно выделить четыре основных типа: тепловые; химические; облучающие и биологические. Используются также различные способы механической обработки отходов. Наиболее часто применяются первые два из указанных процессов.

Тепловыми называются процессы, основанные на использовании теплоты (тепловой энергии) для уничтожения инфекционной составляющей в отходах. Они подразделяются на низко-, средне- и высокотемпературные термические процессы.

В первых используют тепловую энергию для обеззараживания отходов при температурах, недостаточных для осуществления химического распада,



поддержания горения или пиролиза (от 90 до 180 °С). Двумя основными видами низкотемпературных тепловых процессов является дезинфекция влажным (пар) и сухим (горячий воздух) теплом. Влажная термообработка включает использование пара для дезинфицирования отходов и обычно осуществляется в автоклавах. Микроволновая обработка является по сути паровой дезинфекцией, поскольку вода добавляется в отходы, и дезинфекция происходит благодаря энергии микроволн. В сухих тепловых процессах ни воду, ни пар не добавляют. Вместо этого отходы нагреваются за счет теплопроводности, естественной или вынужденной конвекции, и/или теплового излучения с использованием инфракрасных грелок.

Среднетемпературные термические процессы происходят при 170... 370 °С и сопровождаются химическим распадом органических материалов. Они являются основой для относительно новых технологий. Процессы включают обратную полимеризацию с использованием высокоинтенсивной микроволновой энергии и тепловой деполимеризации, основанных на теплоте и высоком давлении.

Высокотемпературные термические процессы в основном осуществляются при температурах 540... 830 °С и выше. Источниками нагрева могут служить электрическое сопротивление, индукционный нагрев, энергия плазменной струи и пр. Высокотемпературные процессы сопровождаются химическими и физическими изменениями в органических и неорганических материалах, приводящих к полной деструкции отходов, а также значительными изменениями их массы и объема.

В химических процессах используются дезинфицирующие средства, такие как растворенная двуокись хлора, отбеливающее вещество (хлорноватисто-кислый натрий), надуксусная кислота или сухие неорганические химические вещества. Для усиления воздействия на отходы химических реагентов в данные процессы часто включают измельчение, размалывание или смешивание. В жидкостных системах отходы могут проходить обезвоживающую секцию для удаления и повторного использования дезинфицирующего вещества. Помимо химических дезинфицирующих, существуют и герметизирующие (капсулирующие) составы, с помощью которых производят капсулирование колющих предметов, а также отвердевание крови или других жидкостей организма в пределах твердой матрицы перед удалением. В одних разрабатываемых технологиях используют озон для переработки медицинских отходов, а в других — каталитическое окисление. В новых системах применяют щелочь для гидролиза тканей в нагретых резервуарах из нержавеющей стали.

В процессах облучения используются различные способы лучевого воздействия для уничтожения микроорганизмов в отходах, химической диссоциации и разрыва клеточных оболочек. Эффективность патогенной деструкции зависит от дозы, по-

ложенной массой отходов, которая в свою очередь связана с плотностью отходов и электронной энергией. Бактерицидное ультрафиолетовое излучение использовали как дополнение к другим технологиям очистки. Однако оно требует мощного источника излучения, а также специальных мер защиты обслуживающего персонала. Кроме того, возникает дополнительная проблема захоронения теперь уже облученных отходов. Облучение не изменяет отходы физически, поэтому требуется дробление или измельчение.

В биологических процессах используются ферменты для уничтожения органических веществ. На биологических процессах базировались только несколько известных из литературы технологий уничтожения медицинских отходов без сжигания.

Анализ технологий, используемых для переработки и уничтожения отходов, показывает, что термические процессы продолжают занимать ведущие позиции при обработке отходов. Одним из наиболее перспективных направлений представляется применение плазменных технологий.

Процессы переработки различных видов отходов с помощью плазмотронов стали реализовываться сравнительно недавно, однако анализ имеющихся данных свидетельствует о том, что многие из передовых стран ведут разработки именно в этом направлении [10].

Температура плазменной струи способна полностью разрушить любые органические и биологические материалы, уничтожить самые токсичные яды, переплавить и испарить наиболее тугоплавкие неорганические соединения, значительно сократить объем отходов в целом. Процесс плазменной переработки является экологически чистым, в газообразных продуктах отсутствуют смолы, фенолы и сложные углеводороды (диоксины и фураны), загрязняющие отходящие газы. Зола, удаляемая из реактора в жидком состоянии, безопасна при захоронении. Шлаковый расплав при выпуске можно гранулировать и направлять в строительство, а металл использовать для выпуска сплавов, лигатуры, рафинирующего передела. Кроме того, существует возможность получения экологически чистого синтез-газа, представляющего собой смесь водорода и оксида углерода, который является ценным энерге-

#### Экономические показатели различных способов обработки отходов

Способ обработки	Стоимость обработки, дол. США / т	
	минимальная	максимальная
Традиционное сгорание	100	140
Пиролиз, термолиз	90	150
Плазменный без генерации синтез-газа	100	120
То же, с генерацией синтез-газа	70	80

тическим сырьем, используемым в качестве дополнительного источника энергии непосредственно в агрегате переработки отходов или вне его.

В настоящее время предлагаются различные схемы использования плазменной дуги для переработки высокотоксичных отходов, созданы опытно-промышленные и промышленные агрегаты для их реализации.

Как показывает анализ, плазменные технологии более экономичны [18], по сравнению с другими способами (таблица).

Рассмотрим примеры использования плазменных процессов для уничтожения опасных медицинских отходов и их основные технико-экономические и экологические показатели в сравнении с каноническими процессами обработки отходов, в частности со сжиганием в мусоросжигательных печах.

### Плазменные технологии переработки отходов

Фирмой «Plasma Energy Applied Technology Incorporated», Huntsville, AL, USA, предложен аппарат и способ обработки опасных и неопасных отходов, содержащих органические и неорганические компоненты [19, 20]. Аппарат включает плазменную систему нагрева и систему обработки газов, преобразующие отходы в твердую доброкачественную составляющую и пригодный к использованию газ.

Предложенная система обеспечивает обработку широкого спектра отходов по типу и составу, в том числе содержащих неравномерное количество и распределение влаги, без предварительной специальной сортировки. В ней обеспечивается постоянное поддержание высокой температуры в течение всего процесса обработки с целью гарантированного уничтожения всех комплексных органических ма-

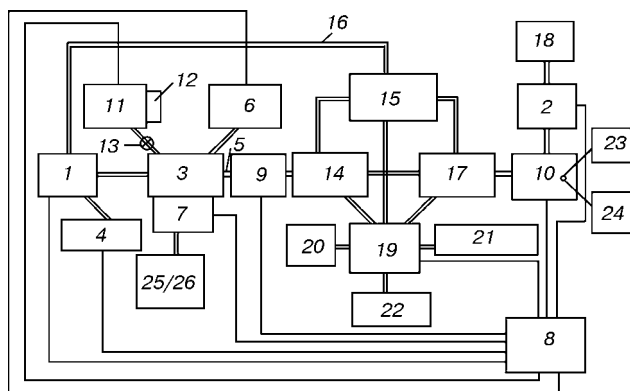


Рис. 2. Принципиальная схема аппарата фирмы «Plasma Energy Applied Technology Incorporated» для обработки опасных отходов [20]: 1 – система подачи; 2 – вытяжной вентилятор; 3 – рабочая камера; 4 – система дезинфекции; 5 – газоотвод; 6 – система плазменного нагрева; 7 – выпускное отверстие (клапан) стеклоподобного шлака; 8 – контроль и управление процессом; 9, 10 – соответственно первое и второе устройство контроля газа; 11 – система подачи окислителя; 12 – парогенератор; 13 – паровой клапан; 14 – охладитель газа; 15 – система переработки частиц; 16 – трубопровод; 17 – газоочиститель; 18 – система регенерации энергии; 19 – система обработки воды; 20 – подача воды; 21 – подача нейтрализующего (щелочного) агента; 22 – подача в коллектор; 23 – анализатор теплопроводности; 24 – инфракрасный анализатор; 25 – герметичный водный бак; 26 – система обработки твердого остатка

териалов, их переработки в отходящий газ, а также переплава всех неорганических отходов в твердые остатки, в соответствии с требованиями АООС.

Принципиальные схемы аппарата и системы подачи отходов и камеры обработки представлены на рис. 2 и 3.

Установка включает вертикальную камеру обработки отходов, представляющую собой плазменно-дуговую печь с футерованным огнеупором сосудом, как правило, цилиндрической формы. Сосуд спроектирован так, чтобы мог выдерживать температуру приблизительно до 1850 °С в восстановительной атмосфере. Он включает центральную цилиндрическую, верхнюю и нижнюю полусферические секции, собранные через фланцевые соединения для обеспечения герметичности конструкции. Подающая конвейерная труба как и система вентиляционных труб размещаются вдоль стенок центральной секции. Стандартный плазматрон установлен через наклонный проем-держатель, предусмотренный в центральной секции. Газоотвод или выпуск расположен в верхней секции камеры обработки. По системе газоотвода газ транспортируется к системе охлаждения с температурой примерно 875...1000 °С. Газоотвод должен обеспечивать герметичность и препятствовать воспламенению горячих газов. Он футерован огнеупорами для поддержания температуры газа выше 875 °С. Нижняя секция камеры об-

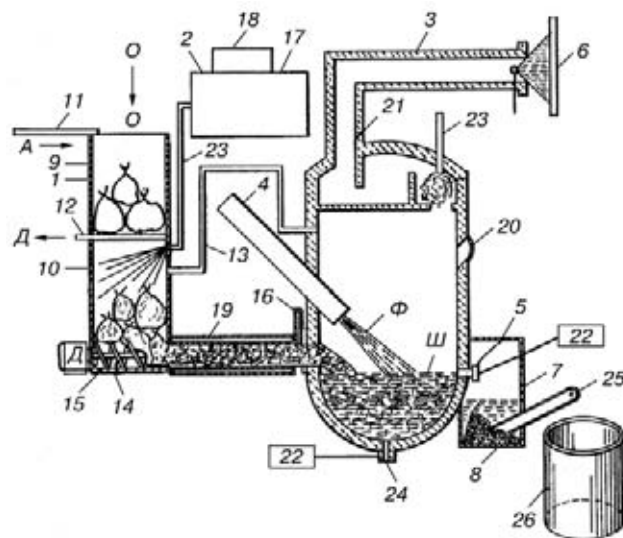


Рис. 3. Схематическое изображение подачи отходов и камеры обработки аппарата фирмы «Plasma Energy Applied Technology Incorporated» для обработки опасных отходов: 1 – система подачи; 2 – система дезинфекции; 3 – газоотвод; 4 – плазматрон; 5 – выпускное отверстие (клапан) стеклоподобного шлака; 6 – охладитель газа; 7 – герметичный водный бак; 8 – система обработки твердого остатка; 9 – загрузочный бункер (воронка); 10 – питающий бункер (бункерное загрузочное устройство); 11 – шлюзовая заслонка; 12 – шибберная шлюзовая заслонка; 13 – выпускная система; 14 – транспортный шнек; 15 – транспортная труба; 16 – водоохлаждаемый шибберный затвор питающей труб; 17 – подача дезинфицирующего раствора; 18 – насос; 19 – транспортная труба; 20 – смотровой канал; 21 – газовый клапан (выпускной); 22 – система позиционирования пробками; 23 – инжектор; 24 – нижнее выпускное отверстие; 25 – конвейер для перемещения твердого шлака в бункер для последующей транспортировки и удаления; 26 – бункер (резервуар-накопитель); Д – двигатель; Ш – шлак; Ф – плазменный факел; О – отходы

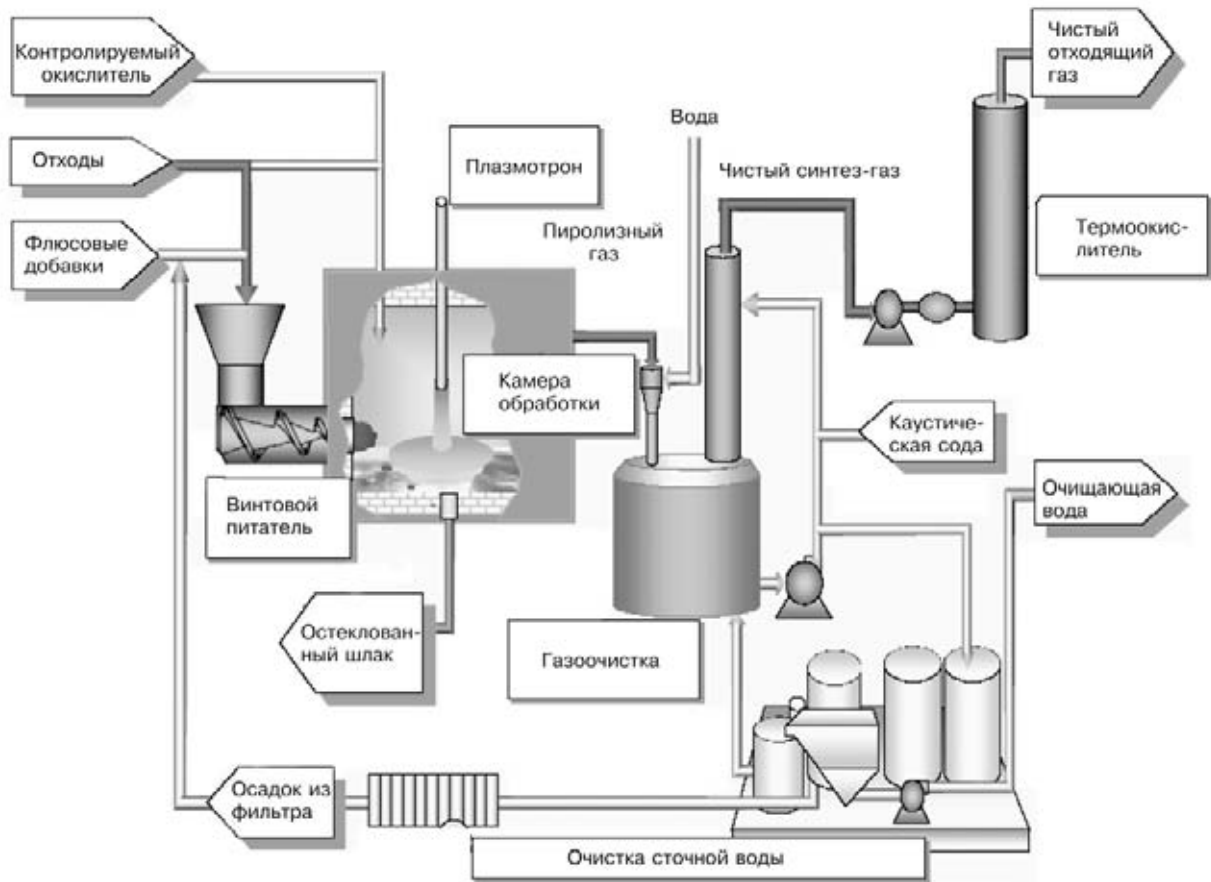


Рис. 4. Схема процесса PEPS®

работки включает желоб для выпуска стекловидного шлака, управляемый системой позиционирования желоба. Шлак формирует ванну III в нижней секции. Желоб имеет определенный диаметр, позволяющий выпуск стекловидного шлака переливом. Металлический остаток по мере накопления может отводиться через донный желоб, который позволяет освободить камеру.

Отходы вводятся в камеру обработки с управляемой скоростью подачи и нагреваются там плазменной дугой до значений температуры, близких к 1650 °С, с целью преобразования органической части отходов в газ, включающий водород, монооксид и диоксид углерода, а также углеродистые частицы. Неорганические компоненты отходов преобразуются при этом в расплавленный материал.

Подача материала в камеру обработки осуществляется путем введения отходов в расплавленный шлак, образующийся в нижней секции, а не в плазменный факел Ф. Подача отходов в шлак улучшает захват металлов в стекловидном материале и минимизирует их вовлечение в отходящий газ. В камере обработки отходы поглощают энергию конвекцией, проводимостью и излучением от плазменного пламени, нагретых огнеупорной футеровки и газов, циркулирующих в камере. С нагреванием органическая часть отходов становится все более неустойчивой, пока не диссоциирует на элементарные составляющие, преимущественно углерод и водород.

Кислород и галогены (если присутствуют в отходах) высвобождаются также. Время диссоциации различных материалов несколько отличается, но обычно составляет миллисекунды для большинства составов при 1100 °С. Высвобождаемый газ быстро увеличивается в объеме и движется из камеры в газоотвод, унося с собой часть чистых углеродистых частиц, образовавшихся при разложении отходов.

Отходящий газ выходит из камеры обработки с температурой 875... 1000 °С. Расплавленные материалы выводятся из камеры обработки и затем охлаждаются с образованием невывецаживаемого твердого шлака и металлической части.

В ходе обработки контролируется количество углеродистых частиц, вовлеченных в отходящие газы, а также отношение моно- и диоксида углерода в отходящих газах. При чрезмерном содержании углеродистых частиц в отходящих газах в камеру обработки вводят окислитель в количестве, необходимом для преобразования углеродистых частиц в монооксид углерода. Количество окислителя, вводимого в камеру обработки, контролируют посредством системы управления технологическим процессом с целью одновременного минимизирования образования диоксида углерода и обеспечения максимального преобразования углерода в газ. Для предотвращения появления комплексных органических соединений из отходящих газов система обработки отходов поддерживает температуру отходя-



Рис. 5. Передвижная установка PEPS®

щих газов на уровне 875 °С до тех пор, пока они не будут быстро охлаждены до температуры ниже 150 °С. В процессе охлаждения часть частиц отделяется от охлажденного газа. Далее кислотные газы в охлажденном отходящем газе нейтрализуются, оставшаяся часть частиц сепарируется, чтобы сформировать газ-продукт, состоящий в значительной степени из водорода и монооксида углерода. Сепарированные углеродистые частицы вводят в камеру обработки для дальнейшей обработки. Состав газа-продукта непрерывно проверяют для определения эффективности ввода окислителя.

Система предусматривает безопасную подачу отходов в камеру обработки и изоляцию их от окружающей среды. Процесс переработки полностью автоматизирован и контролируется специальной системой управления.

При мощности плазматронов 500 кВт система обрабатывает примерно 450 кг отходов в 1 ч. При

вдвое меньшей мощности плазматрона и пропорционально меньшей рабочей камере обрабатывается приблизительно 225 кг в 1 ч. Данные системы имеют мощности, необходимые для обеспечения потребностей больниц средних размеров. Региональный центр обработки, обслуживающий многочисленные больницы в большом городе, может использовать плазматроны мощностью 1000 кВт и обрабатывать приблизительно до 25 т отходов в день.

Указанная система свободна от множества недостатков известных систем и может использоваться для относительно полной и безопасной обработки всех медицинских отходов (опасных и неопасных, неорганических и органических компонентов медицинских отходов, содержащих изменяющееся количество влаги), удовлетворяя всем требованиям стандартов по количеству выделений в атмосферу и воду. Плазменная система нагрева сохраняет постоянной высокую температуру в камере обработки и управляет температурой отходящих газов для получения конечного продукта, содержащего минимально опасные составляющие. Система обработки отходов производит твердые остатки в виде стекловидного шлака и металлов в соответствии с экологическими критериями, которые могут использоваться повторно или даже многократно. Система эффективна для безопасного уничтожения химических ядов и т. п.

Фирмой «Vanguard Research, Inc. Fairfax», VA, USA предложена система плазменно-энергетического пиролиза (Plasma Energy Pyrolysis System)

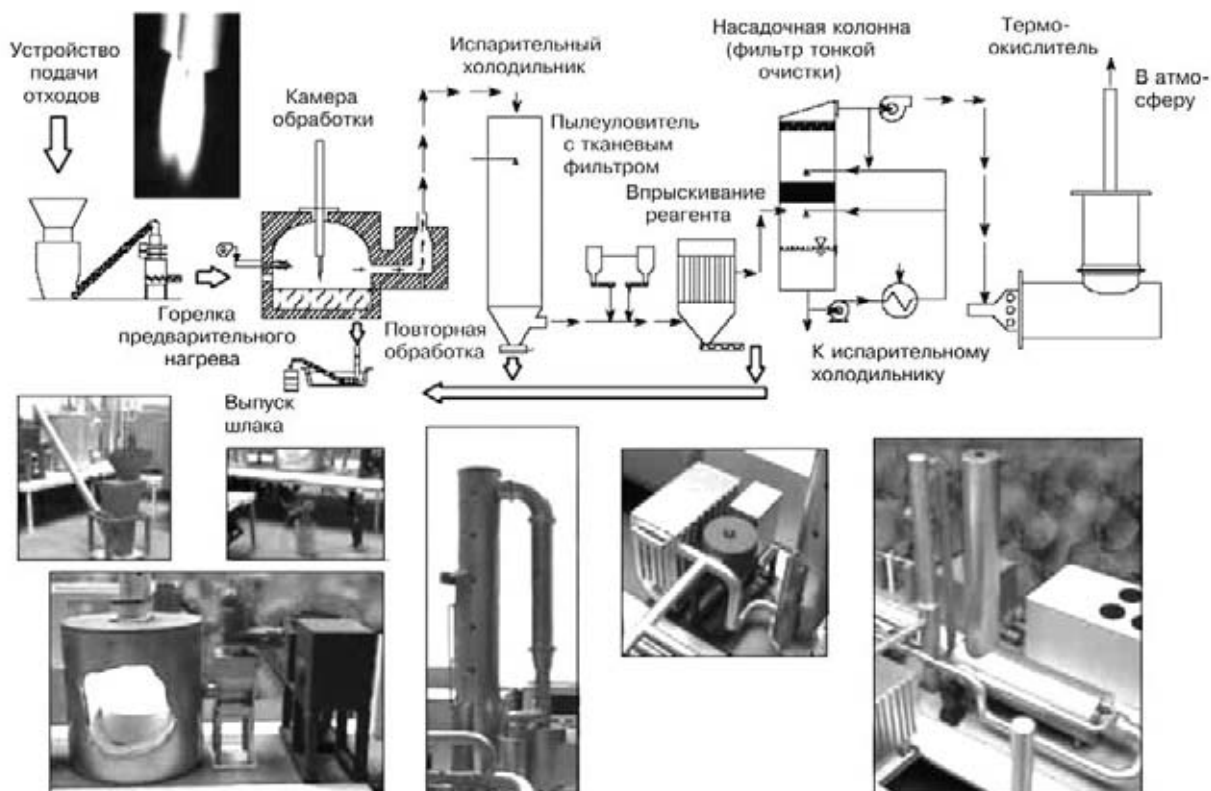


Рис. 6. Схема передвижной установки PEPS®



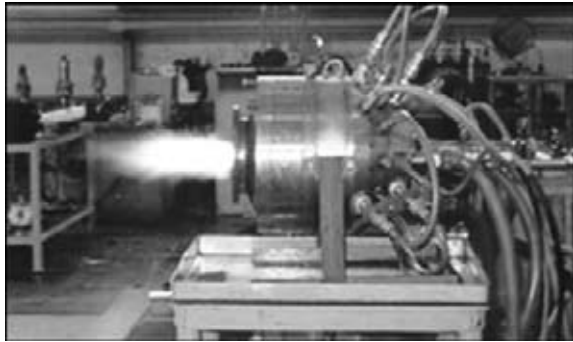


Рис. 7. Трехфазный плазмотрон со стержневым (проволочным) электродом в действии

PEPS® для переработки различных типов отходов, в том числе медицинских (рис. 4) [21].

При PEPS® используют управляемый пиролиз без сжигания с температурой примерно 1650 °С. В ходе процесса высокотемпературная плазма преобразует отходы в элементы (углерод, водород, кислород, азот), органические соединения ( $C_xH_y$ ) — в синтез-газ, а неорганические составляющие переплавляются и переходят в невыщелачиваемый стекловидный шлак. Металлы могут быть также извлечены для повторного использования. Обедненная кислородом (восстановительная) атмосфера предотвращает горение и ограничивает объем опасных побочных продуктов ( $NO_x$ ,  $SO_x$ , диоксины, фураны).

С использованием PEPS® могут быть обработаны электролитические шламы, медицинские отходы; абразивные отходы; пиротехнические заряды; жидкие органические вещества, отходы топлива и др.

Процесс PEPS® позволяет обеспечить полное уничтожение (разрушение) опасных компонентов — до 99,99999 %, при этом уровень выбросов гарантируется ниже установленного АООС. Полученный синтез-газ может быть использован для воспроизводства энергии. Не требуется предварительная сортировка отходов, допускается их гетерогенность по составу.

Демонстрационное предприятие PEPS® в Лортон, Вирджиния, эксплуатируется с 1998 г. и перерабатывает 10 т отходов в день. При этом мощность используемого плазмотрона составляет 500 кВт.

Разработан мобильный вариант оборудования (рис. 5, 6), позволяющего производить уничтожение отходов непосредственно в месте их производства.



Рис. 8. Электроды плазмотрона



Рис. 9. Различные плазмотроны переменного тока

Научно-производственный центр «Солитон-НТТ» и Институт проблем электрофизики (РФ) разработали перспективные плазменно-химические технологии для обработки отходов с использованием генераторов плотной плазмы с плазмотронами переменного тока (рис. 7–10) [18]. Технологии позволяют реализовать полное разрушение и утилизацию различных опасных отходов, а также и производить синтез-газ для энергетической генерации с помощью объединенных генераторов переменной частоты.

Создана и изготовлена опытная установка для плазменного уничтожения опасных медицинских отходов производительностью 5 т в день (рис. 11). Также могут быть изготовлены установки с намного большей производительностью.

Для плазменного сжигания медицинских отходов используют футерованную вращающуюся печь (рис. 12). Ее корпус установлен под углом к горизонту. При вращении сжигаемые отходы постоянно смешиваются, что способствует предотвращению сплавления или спекания в слое, а также интенсификации процессов тепло- и массообмена.

Отходы подаются в печь периодически в плоских коробах через систему лотков с помощью пневмотолкателя. Плазмотроны переменного тока, установленные в торцевой поверхности загрузочного устройства используются для начального нагрева печи при запуске и поддержания заданной температуры в процессе работы.

Температура топочных газов на выходе печи поддерживается на уровне 1000...1200 °С. Топочные газы идут в камеру дожигания с температурой

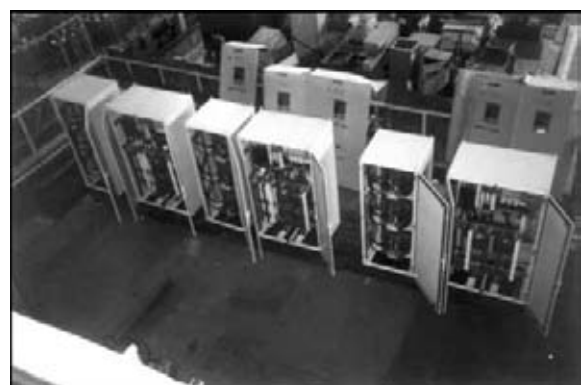


Рис. 10. Источники питания и шкафы управления

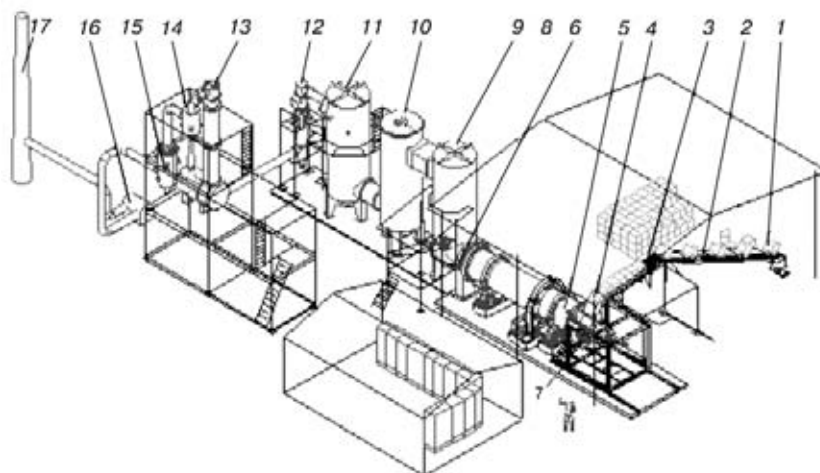


Рис. 11. Схема установки для плазменного уничтожения опасных медицинских отходов: 1 — бункер с отходами; 2 — ленточный транспортер; 3 — валковая мельница (вращающиеся цилиндры); 4 — загрузочное устройство; 5 — вращающаяся печь; 6 — камера сухой очистки (сухой скруббер); 7, 8 — плазматроны; 9 — камера дожигания; 10 — устройство сухой очистки (сухой скруббер); 11 — охладитель (гаситель); 12 — теплообменник; 13 — устройство мокрой очистки (мокрый скруббер) с трубой Вентури; 14 — туманоуловитель; 15 — фильтр; 16 — нагнетатель; 17 — вытяжная башня (дымовая труба)

1200... 1400 °С. Время выдержки составляет примерно 2 с, что достаточно для эффективного обеззараживания всех токсичных органических продуктов, включая и галогенсодержащие. Плазматрон также сохраняет температурный режим в камере сжигания. Затем топочные газы подаются в сухой скруббер, где происходит их резкое охлаждение с целью предотвращения вторичного формирования токсичных выбросов. Одновременно происходит процесс разложения оксида азота, для чего подается водный раствор мочевины.

Перед обработкой топочных газов их температура уменьшается сначала в охлаждающей жидкости (гасителе) за счет инжекции воды, а затем в теплообменнике, передающем часть теплоты холодному воздуху, используемому в технологических целях.

Способ влажной газоочистки выбран для выхода топочных газов из зольной пыли, сажи, тяжелых металлов и кислотных газов. Процесс про-

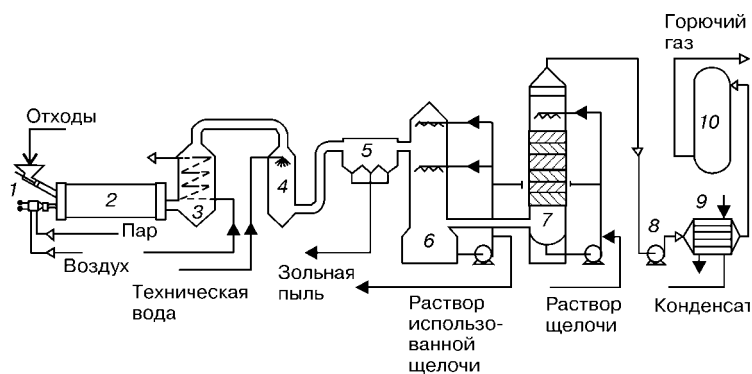


Рис. 13. Схема плазменной пиролизной обработки твердых бытовых отходов: 1 — плазматрон; 2 — вращающаяся печь; 3 — котел; 4 — охладитель; 5 — мешочный (рукавный) фильтр; 6, 7 — скрубберы; 8 — компрессор; 9 — холодильник; 10 — газохранилище (газгольдер)

исходит во влажном скруббере с использованием трубы Вентури, объединяющем несколько стадий газоочистки. Раствор натрия  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  используется как распыляющий раствор.

Туманоуловитель спроектирован на выходе влажного скруббера с трубой Вентури для очистки топочных газов от тонкой пыли, аэрозолей, остатков кислотных газов и улавливания капель нейтрализующего раствора. В ходе газоочистки от соединений тяжелых металлов и диоксинов используется процесс адсорбции на активированном угле. Затем топочные газы разбавляют нагретым воздухом и удаляют в атмосферу через вытяжную башню (дымовую трубу).

Разработан проект опытной установки для обработки 15 т твердых отходов в день с производством синтез-газа для генератора мощностью

15 МВт (рис. 13).

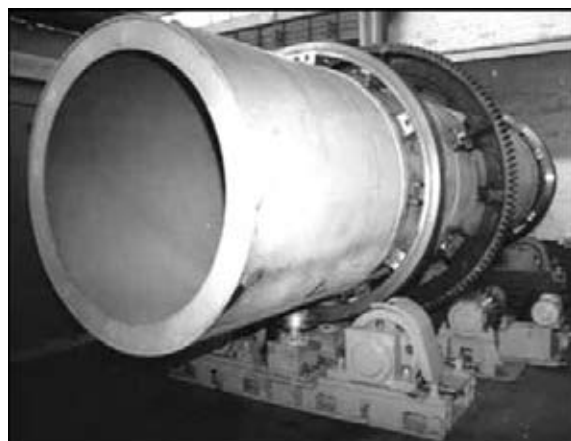


Рис. 12. Корпус футерованной вращающейся печи

Технология базируется на термическом воздействии на поступающие отходы в газовую среду с дефицитом кислорода. В ходе обработки отходы сепарируются на органические и минеральные, а затем органические компоненты газифицируются. Образовавшиеся зольные остатки удаляются и могут либо использоваться в строительстве, либо размещаться традиционно (захораниваться) с уменьшением объема в 50... 400 раз. Низкое содержание кислорода в реакционной зоне приводит к неполному окислению горючих элементов. Топочные газы после реактора охлаждаются, формируя синтез-газ — ценный химический и энергетический продукт.

Процесс плазмопиролитического разрушения отходов реализован во вращающейся печи при температуре 1100... 1200 °С. Воздух, нагретый плазматронами до 2000... 2500 °С (при необходимости, водя-



ной пар), подается в печь для преобразования ТБО в горючий газ. Тепловая энергия синтез-газа используется в котле, производящем водяной пар, для применения в установке, а также для поставки пользователям. Очищенный синтез-газ сжимается в компрессоре при давлении 0,3... 0,5 МПа и после охлаждения в холодильнике подается в газохранилище (газгольдер). Синтез-газ из газгольдера поступает к источнику питания для генерации электроэнергии и производства воды.

По сравнению с традиционным сгоранием, плазменно-химические установки имеют следующие преимущества: возможность регулирования температуры в основном реакторе от (1000 до 10 000 °С; глубокое разрушение отходов, что сопровождается одновременным уменьшением объема отработанных газов; многократное уменьшение массовых и габаритных характеристик реактора и установки по сравнению с традиционными печами; возможность полного автоматического регулирования процесса; минимальные затраты времени и средств для обслуживания высокотемпературных плазменных источников; более полное преобразование углерода в СО<sub>2</sub> или СО; получение побочной недорогой электроэнергии; безопасность побочных продуктов плазменной обработки и соответствие их экологическим стандартам.

1. *Отходы учреждений здравоохранения: современное состояние проблемы, пути решения* // Под ред. Л. П. Зуевой. — СПб, 2003. — 43 с.
2. *Базельская Конвенция о контроле за трансграничной перевозкой опасных отходов и их удалением. Заключительный акт* // Программа ООН по охране окружающей среды. — Женева, 1989 — 98 с.
3. <http://ru.ruschina.net/news/ecol>.
4. <http://asozd.duma.gov.ru/intranet/kom13.nsf/1/11B3583664B3140BC3-256BF40041657F?OpenDocument>.
5. <http://www.tulane.edu/~greenclb/audit/medwaste.html>.
6. <http://www.dez.ru/info/expert/mir-ov/obosnovanie.html>.
7. *Региональные руководства по обращению с отходами здравоохранения в развивающихся странах: Док. регион. семинара ВОЗ по обращению с клиническими отходами (Куала Лумпур, 28 нояб. — 2 дек. 1994 г.)*. — Куала Лумпур, 1994. — 215 с.
8. *Прюсс А., Тоуненд В. К.* Обращение с отходами здравоохранения: Практ. руковод. для обучения. — Женева, 1998. — 256 с.
9. *Русаков Н., Бормашов А.* Пять классов опасности // Медицинский вестник. — 2002. — 29 нояб.
10. *Non-Incineration medical waste treatment technologies* // A Resource for hospital administrators, facility managers, health care professionals, environmental advocates and community members. — 2001. — August ([www.noharm.org](http://www.noharm.org)).
11. *Guide for Infectious Waste Management*. — Washington, 1986. — 27 p.
12. *Современные решения по переработке твердых бытовых отходов* // Аналит. отчет Управления главгосэкспертизы России по Ставропольскому краю. — Ставрополь, 2004 (<http://www.stavexpert.ru/17.htm>).
13. *Allsopp M, Costner P, Johnston P.* Incineration and human health: State of knowledge of the Impacts of Waste Incinerators on Human Health / Greenpeace Research laboratories, University of Exeter: — Exeter, UK, 2001.
14. *Tangri N.* Waste incineration: A dying technology // Alliance for Incinerator Alternatives. — 2003.
15. *Resources up in Flames: The Economic Pitfalls of Incineration versus a Zero Waste Approach in the Global South* // Ibid. — 2004.
16. *Юфим С.* Типичные ошибки авторов проектов мусоросжигательных заводов // Городское управление. — 2000. — N 5. — С. 68–71.
17. *Юфим С.* Мусоросжигательные заводы — помойка на небе: Курс лекций. Вып. 2. Яды вокруг нас. — М., 1994 (<http://www.ecoline.ru/mc/books/yufit/index.html>)
18. <http://soliton.msk.ru/hazard.html>
19. *Pat. 5,534,659USA, A62D3/00.* Apparatus and method for treating hazardous waste / M. D. Springer, T. Barkiey, W. C. Burns. — Publ. 09.07.1996.
20. <http://www.peat.com>
21. <http://www.vrifix.com/peps/>

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

Поступила 06.04.2005



## ПОЛУЧЕНИЕ РАСХОДУЕМЫХ ЭЛЕКТРОДОВ КОМПАКТИРОВАНИЕМ ТИТАНОВОЙ ГУБКИ ПОД ТОКОМ

**М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, В. С. Константинов,  
В. В. Степаненко, Г. Ф. Торхов, В. Р. Бурнашев,  
Н. В. Рейда, В. И. Колесниченко**

Дан краткий анализ технологических схем изготовления прессованной заготовки из некомпактной шихты для последующего передела. Показана 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.

Analysis of technological charts of manufacture of a pressed billet from a non-compact charge for subsequent remelting is described briefly. The prospects and economic efficiency of pressing of non-compact charge by combination of processes of electric heating and negligible forces of pressing without use of powerful and expensive press equipment are shown. Design of a pilot installation is described and functional technological charts of pressing non-compact charge and main technological parameters of the process are given.

**Ключевые слова:** компактирование; расходный электрод; титан; губка

После продолжительного спада в последнее время зафиксировано повышение спроса на титановую продукцию. Интерес к титану, отличающемуся комплексом уникальных свойств [1], проявляют даже те отрасли промышленности, в которых раньше его почти не использовали.

Расширение производства и применения титана встречает жесткую конкуренцию со стороны производителей альтернативных конструкционных материалов, и главным аргументом здесь является цена.

Снижение себестоимости титановой продукции при сохранении качества может быть достигнуто путем создания более дешевых и эффективных технологий на всех стадиях сложной цепочки производства изделий на основе титана, начиная с руды и губки. Необходимо разработать новые процессы, позволяющие резко снижать затраты.

Одной из таких разработок, на наш взгляд, является созданная в последние годы в ИЭС им. Е. О. Патона уникальная технология получения расходных электродов из губчатого титана или титановой стружки, суть которой заключается в сочетании процессов электронагрева и прессования без использования мощного и дорогостоящего прессового оборудования. При этом усилие прессования снижается как минимум в 20 раз, по сравнению с традиционным процессом изготовления расходных электродов.

Основным способом производства расходных электродов для переплавных процессов является холодное полунепрерывное прессование через конусную проходную или глухондную матрицу [2], при

котором сцепление кусочков шихты (титановая губка, легирующие, кусковые отходы) осуществляется за счет механического сдавливания контактов, возникающих при больших усилиях деформации, зависящих от пластичности прессуемых материалов.

Так, для получения расходного электрода с требуемыми прочностью и габаритами (диаметр 350...650 мм, длина 5000 мм) необходимо создать колоссальные удельные давления прессования в пределах 6,5...9,0 кПа [3]. Применяемые для этого горизонтальные или вертикальные прессы представляют собой гигантские и дорогостоящие (до 10 млн дол. США) конструкции. Однако даже такое давление не всегда гарантирует получение однородных по составу, прочных и ровных (без трещин) расходных заготовок.

При прессовании в проходную матрицу порция шихты после сжатия в матрице не извлекается из нее полностью. Оставшаяся часть служит подвижным поддоном для последующей порции. При максимальных значениях усилий прессования с одновременным сжатием осуществляется перемещение прессовки вдоль внутренней поверхности матрицы. Процесс протекает непрерывно до достижения необходимых размеров отпрессованной заготовки. В силу специфики процесса прессования происходит опережающее движение центральных слоев каждой порции относительно ее периферийных слоев, прилегающих к внутренним стенкам матрицы. В результате больших растягивающих напряжений возникают трещины, могущие стать причиной разрушения расходного электрода во время плавки и выхода печи со строя. Еще одним недостатком такого вида прессования является насыщение поверхности электрода вредными примесями железа



вследствие трения кусочков губки о внутреннюю поверхность матрицы.

Другой распространенный способ изготовления расходуемого электрода предусматривает холодное прессование губчатого титана в глухондунную матрицу с получением пресс-шайб диаметром 300... 500 мм, высотой не более 200... 250 мм, которые затем свариваются в электрод необходимой длины. Сварку осуществляют с помощью плазмотронов или электронно-лучевых источников нагрева. Преимуществом этого способа является отсутствие трещин на поверхности электрода, однако дополнительный процесс сварки способствует загрязнению поверхности электрода газовыми примесями, кроме того, требуется использование специальных печей.

Следует также отметить, что этот способ не является универсальным для всех металлических материалов. Высокопрочные, легированные стали и другие высокопрочные сплавы фактически не поддаются компактированию указанным способом, поскольку для их прессования из-за малой пластичности необходимы еще более высокие давления, что приводит к снижению производительности и повышению себестоимости продукции.

Значительно снизить усилия прессования и использовать имеющиеся недорогие прессы можно посредством сочетания прессования с нагревом для повышения пластичности шихты. Нагрев осуществляется, как правило, путем пропускания электрического тока через шихту.

Способ электроимпульсного прессования металлической стружки, преимущественно титановой [4], состоит в прессовании стружки при сравнительно небольшом уровне давления (до 5 кПа) для высокопрочных сплавов и пористости брикетов (примерно 50 %), а затем ее подвергают специальной магнитно-гидродинамической (МГД) обработке с использованием коротких импульсов электрического тока, длительность и амплитуду которых определяют в зависимости от целого комплекса физических характеристик прессуемого материала (удельное электросопротивление, магнитная проницаемость, температура плавления, размеры стружки и пр.).

Механизм нагрева и соединения предварительно спрессованной стружки в брикет основан на следующем. Поскольку сопротивление контактов между частицами стружки значительно выше, чем омическое сопротивление самих частиц, то джоулева энергия при протекании тока выделяется практически только в местах контактов между частицами. При этом длительность импульсов тока задается таким образом, чтобы за время импульса энергия не успевала отводиться из зоны контактов теплопроводностью ( $< 0,001$  с). Это дает возможность локального разогрева зоны контактов между частицами шихты без разогрева всей ее массы. В результате происходит микросварка контактов, при этом реализуется механизм соединения, отличающийся от обычной диффузионной сварки, так как диффузия не может осуществляться столь быстро.

Сложность реализации такого способа брикетирования заключается в том, что для достижения прочной микросварки контактов в брикете необходимо обеспечить оптимальное сочетание двух параметров — длительности и амплитуды импульса то-

ка, причем индивидуально для каждого материала; если длительность импульса удовлетворяет указанному соотношению, а уровень тока недостаточен, то микросварка контактов не происходит либо сваривается лишь незначительное количество мелких контактов, в результате чего прочность брикета снижается, и он может вообще рассыпаться. Если же количество энергии, вводимой в контакты, слишком велико вследствие повышения амплитуды импульса, то происходит плавление контактов и их разрушение из-за развития МГД неустойчивости, причем, чем выше плотность брикета, больше вероятность МГД разрушения. Поэтому таким способом можно получить лишь брикеты плотностью не более 50 % теоретической плотности металла. Такая плотность не всегда достаточна для последующей переработки и транспортировки полученных брикетов.

Специфика индивидуального подбора оптимальных соотношений длительности и амплитуды импульса тока не позволяет производить совместное брикетирование разных сортов стружки, получать композитные и биметаллические соединения, исключает ввод легирующих элементов, что существенно ограничивает технологические возможности этого способа.

Поскольку при электроимпульсном прессовании нагревают незначительную часть стружки (в зоне контактов) до относительно небольшой температуры и на очень короткое время, основная масса стружки при обработке прессовки таким импульсом тока нагревается незначительно (до 200 °С). При такой температуре крайне заторможены процессы десорбции и удаления из стружки газов, влаги, эмульсии (смазочно-охлаждаемой жидкости), происходит их своеобразное захватывание в сварном каркасе, что существенно снижает качество брикетов.

Способ брикетирования стружки, сочетающий электронагрев постоянным током и прессование, состоит в следующем [5]. Дробленую и очищенную стружку, в частности титановую, загружают в герметичную электроизолированную пресс-форму, включают пресс, который создает давление 0,20... 0,25 кПа. При этом происходит предварительное уплотнение стружки: через пресс-форму прокачивают инертный газ аргон с добавлением водорода для создания инертной среды, пропускают постоянный электрический ток плотностью 8... 11 А/мм<sup>2</sup> в течение 10... 15 с, после чего происходят дальнейшее уплотнение стружки и образование механических контактов за счет деформации металла. Электрический ток используют для разогрева всей стружки с целью увеличения ее пластичности, что позволяет получать брикеты при вдвое меньшем усилии прессования, чем при электроимпульсном брикетировании.

Тем не менее полученные таким образом брикеты в ряде случаев имеют недостаточные плотность и прочность, поскольку при указанных режимах невозможно образование прочных и надежных контактов между частицами стружки за счет их спекания вследствие недостаточного прогрева всей массы стружки и зон контакта ее элементов. Временное сопротивление титановых сплавов начинает резко снижаться лишь при температуре 600 °С, а при

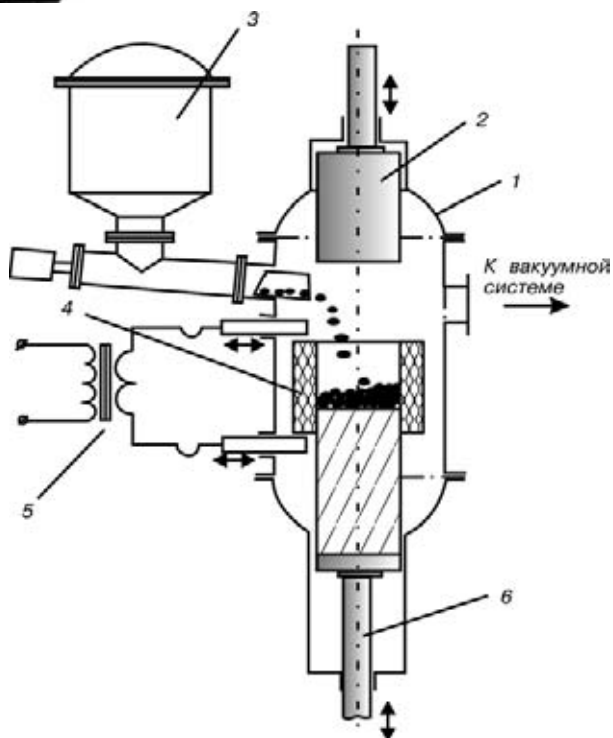


Рис. 1. Схема опытной установки компактирования шихты в заготовку для последующего передела; обозн. поз. 1–6 см. в тексте

1000 °С составляет всего 3... 5 %  $\sigma_{\text{в}}$  в условиях нормальной температуры [6].

Недостаточно высокая температура, присущая анализируемому способу, снижает эффективность удаления из стружки газовых примесей, следов масел и охлаждающих эмульсий, несмотря на принудительную циркуляцию аргоно-водородной смеси. К тому же, для применения водорода требуется обеспечение повышенных мер безопасности процесса.

Главным недостатком двух последних способов является то, что процесс брикетирования производится в глухой пресс-форме (матрице), причем один из токоподводов осуществляется к неподвижному дну матрицы (к нижнему пуансону-электроду). Такое решение не позволяет производить длинномерные брикеты в непрерывном или полунепрерывном режиме. По упомянутой схеме можно получать только один брикет ограниченных габаритами матрицы размеров. Так, размеры брикета из титановой стружки, полученного электроимпульсным способом, составляют лишь 60 × 64 × 150 мм, его плотность — 0,4... 2,0 г/см<sup>3</sup>, масса — до 1 кг.

Перед нами стояла задача разработать эффективную технологию получения качественных и экономичных длинномерных заготовок со стабильными физико-механическими свойствами по всей длине из титановой губки и вторичных ресурсов титана (стружки, гранул, кусковых отходов) для дальнейшего вовлечения их в металлооборот в качестве расходных электродов.

Поставленной цели достигли благодаря тому, что компактирование шихты в сочетании с ее прямым электронагревом производили в проходной матрице специальной конструкции, а нижний подвод тока осуществляли не к стационарному (неподвижному) поддону-электроду, а непосредственно на формируемую заготовку или на затравку (в старто-

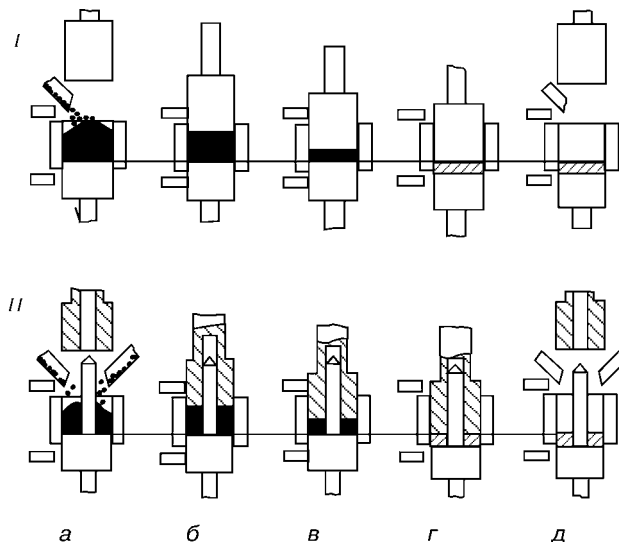


Рис. 2. Технологическая схема прессования электродов: I — сплошного сечения; II — порый; а — загрузка некомпактной шихты; б — предварительное сжатие и нагрев всей порции шихты до температуры выше 0,5  $T_{\text{пл}}$ ; в — осадка и приваривание порции к спрессованной массе; г — проталкивание порции вместе с электродом вниз; д — подъем пуансона

вый период), что существенно снижает электрические потери и повышает КПД. Процесс выполняли порционно в полунепрерывном режиме (уплотняли каждую порцию, а нагревали в два этапа: сначала до температуры десорбции, затем — не ниже, чем до температуры горячей деформации шихты).

Такой режим нагрева в сочетании с уплотнением способствует, во-первых, эффективному удалению газовых и жидкофазных загрязнений с поверхности шихты, во-вторых, прогреву всей массы шихты и существенному повышению пластичности каждого ее элемента, а также возникновению жидкой фазы в зонах их контактов, что в итоге приводит к образованию плотного жидкотвердого пластического соединения как внутри каждой порции, так и между ними.

Предложенная технологическая схема реализована на специально сконструированной опытной установке (рис. 1). В схему установки входит герметичная камера прессования 1, пуансон 2, бункер 3, проходная матрица специальной конструкции 4, источник питания 5, механизм вытягивания 6, системы вакуумирования и газоснабжения.

На установке отработаны технологические параметры компактирования различных сортов и фракций титановой губки, стружки отдельных металлических материалов (титана, стали, чугуна) и некоторых видов легковесного металлолома (листовой обрезь, проволоки, порошков и пр.).

Процесс компактирования происходит в вакууме или контролируемой атмосфере (аргон, гелий или другие газы). На рис. 2 приведена технологическая схема получения компактированной заготовки, включающая такие последовательные операции: загрузку порции некомпактной шихты в матрицу; предварительное сжатие (уплотнение) и электронагрев всей порции шихты до температур в пределах 0,5... 0,8 температуры плавления (в локальных точках температура превышает температуру плавления металла); осадку и приваривание порции к спрессованной массе или затравке (на старте); проталки-

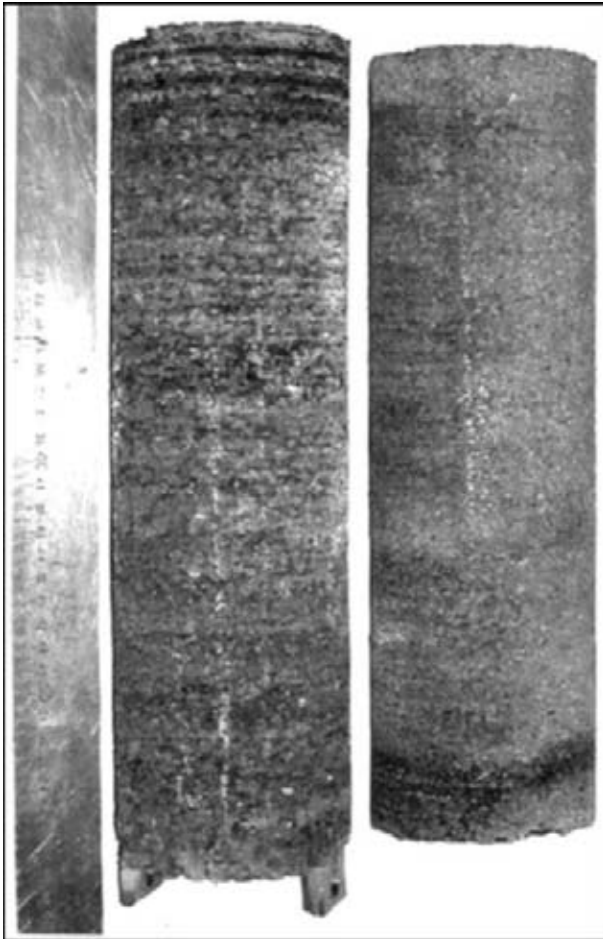


Рис. 3. Общий вид полученных заготовок

вание порции вместе с электродом или затравкой вниз; подъем пуансона.

Затем операции повторяют до получения готового изделия (электрода) заданной длины, которые охлаждаются в вакууме или инертной среде и извлекают.

Таким образом, в результате последовательных циклов получают прочный сварно-спрессованный электрод, в котором отдельные элементы соединены между собой прессованием после предварительного оплавления в местах их контакта.

На рис. 3 приведен общий вид двух электродов, полученных компактированием разных фракций титановой губки, а на рис. 4 — макротемплет фрагмента одного из электродов, на котором показано соединение четырех порций шихты.

Разработанная технология позволила при низких удельных усилиях прессования (примерно 0,5 кПа) получить качественные длинномерные электроды плотностью 80... 90 % теоретической. Эта технология дает возможность получать расходоуемые электроды как сплошного сечения, так и полые. Размеры указанных образцов электродов имели диаметр 100 мм и длину 700 мм. В настоящее время разрабатывают и испытывают матрицы диаметром 200 и 400 мм.

Таким образом, применение предложенной технологии позволяет получать преимущества как экономического характера, так и в плане повышения безопасности производства. При этом исключаются

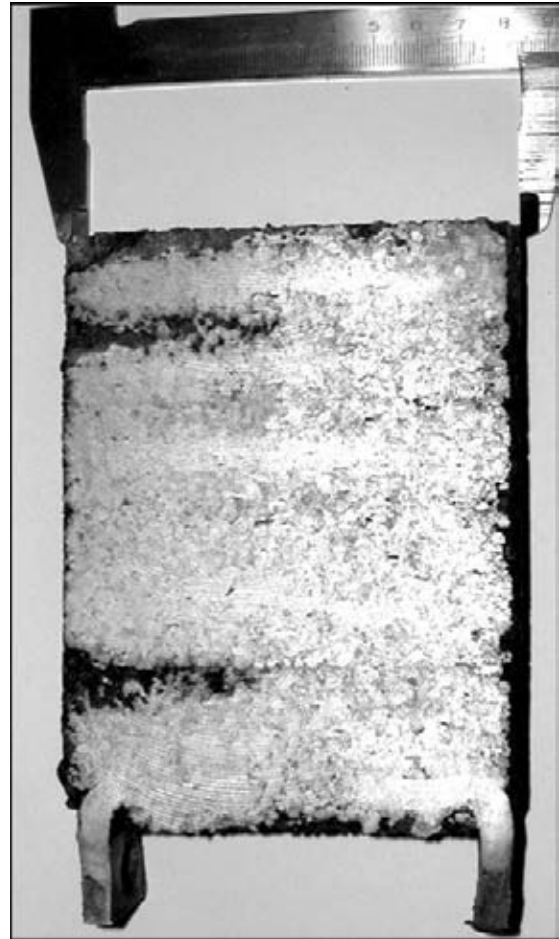


Рис. 4. Макротемплет фрагмента скомпактированной заготовки

использование мощного и дорогостоящего прессового оборудования, а также выполнение ряда технологических операций, присущих традиционной схеме (сварка, вакуумный отжиг и т. д.). В качестве шихты можно использовать целую гамму металлических материалов: губку, порошок, добавки кусковых отходов или 100 % стружки. В случае оснащения установки дозирующими устройствами возможно приготовление сложнолегированных сплавов, а также различных биметаллических и композитных соединений из отходов разных металлов.

1. *Металлургия титана* / В. Л. Гармата, Б. С. Гуляницкий, В. Ю. Крамник и др. — М.: Металлургия, 1968. — 643 с.
2. *Плавка и литье титановых сплавов* / Н. Ф. Аношкин, С. Г. Глазунов, Е. И. Морозов, В. В. Тетюхин. — М.: Металлургия, 1978. — 383 с.
3. *Абрамова К. Б., Самуйлов С. Д., Фиглин Ю. А.* Брикетирование титановой стружки под воздействием коротких импульсов электрического тока // Цвет. металлы. — 1998. — № 12. — С. 43–45.
4. *Пат. 2063304* РФ, МПК В 22 F 3/12. Способ брикетирования металлической стружки // Б. И. Тараненко, А. П. Гусенков, М. М. Моисеенко и др. — Оpubл. 23.07.1992; Бюл. № 27.
5. *А. с. 1748942* СССР, МПК В 22 F 3/12. Способ брикетирования металлической стружки // К. Б. Абрамов, С. Д. Самуйлов, Ю. А. Фиглин. — Оpubл. 10.07.96; Бюл. 19.
6. *Горячая штамповка и прессование титановых сплавов* / Л. А. Никольский, С. З. Фиглин, В. В. Бойцов и др. — М.: Машиностроение, 1975. — 285 с.

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

Поступила 15.06.2005



## СЕМИНАР «МИНИ-ЗАВОДЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ: РАЗВИТИЕ НА ОСНОВЕ ИННОВАЦИЙ»

15–17 февраля 2005 г. в Москве состоялся очередной постоянный семинар по электроплавке и электропечах на тему «Мини-заводы нового поколения: развитие на основе инноваций», организованный ОАО «ВНИИЭТО», ОАО «Гипромез» и журналом «Электрометаллургия» при участии итальянской фирмы «DANIELI Centro Met», входящей в транс-национальную корпорацию «DANIELI & Officine Meccaniche SpA» (сокращенно «ДАНИЭЛИ»). Цель семинара состояла в ознакомлении специалистов и владельцев действующих и строящихся металлургических предприятий с мировыми тенденциями развития сталеплавильного производства.

Для участия в семинаре группа специалистов (С. Г. Овчинников, генеральный директор ОАО «Челябгипромез», В. Д. Смоляренко, советник генерального конструктора ОАО «ВНИИЭТО» и Б. П. Черняховский, директор представительства ОАО «НТМК») подготовила сборник информационных, аналитических и прогнозных материалов, включающий шесть разделов (инновационное развитие электросталеплавильного производства; мини-заводы последнего поколения; новое поколение электродуговых печей; замена мартеновского и конвертерного производства электросталеплавильным; перспективные электросталеплавильные технологии; экологические аспекты электроплавки). Часть материалов, представленных в сборнике, напечатана или готовится к публикации в журнале «Электрометаллургия» — наиболее авторитетном российском издании, посвященном инновационному и развивающемуся электросталеплавильному производству.

В семинаре приняли участие ОАО «Север-сталь», ОАО «НТМК», ОАО «Волжский трубный завод», ОАО «Чусовской МЗ», ОАО «Нытва», ООО «МеталлСплав-Ресурс» (управляющая компания Гурьевского металлургического завода), ООО «Румелко» (управляющая компания НЛМК), НПО «Точмет», ВСМК (Восточно-Сибирская металлургическая компания).

С докладом о взаимодействии металлургов, производителей металлургического оборудования и проектантов при создании электросталеплавильных производств новых поколений выступил В. Д. Смоляренко. Б. П. Черняховский рассказал о заводе Ори Марти в Италии, где впервые использовали инновационную электросталеплавильную технологию Consteel компании «Текинт», получившую распространение на 19 заводах разных стран. М. А. Бесчаснова доложила о проектировании в Гипромезе российских мини-заводов. Все участники семинара обменялись опытом в режиме круглого стола.

По приглашению научного руководителя семинара из Италии прибыл г-н Лука Моттес, региональный менеджер корпорации «ДАНИЭЛИ», выступивший с презентацией по теме «Мини-заводы последнего поколения», специально подготовленной для представителей российских заводов. «ДАНИЭЛИ» является одним из трех мировых лидеров, строящих «под ключ» мини-заводы по всему миру и определяющих вектор инновационного развития мирового сталеплавильного производства (две другие корпорации, конкуренты «ДАНИЭЛИ» на глобальном рынке инновационных металлургических технологий и оборудования, — «ФАИ» и «СМС-Демаг»). Он высоко

оценил технические успехи конкурирующих фирм. В ряде проектов «ДАНИЭЛИ» вступает с ними в стратегические альянсы для скорейшего достижения общих целей.

Докладчик изложил концепцию мини-заводов последнего поколения как единой и компактной технологической линии металлургических агрегатов, выстроенных в одну цепочку, звенья которой максимально приближены и синхронизированы друг с другом посредством локальных и интегральных АСУ ТП. Признаками современного мини-завода являются минимальные продолжительность сквозного технологического цикла от шихты до готового проката (менее 3 ч), затраты энергии, отрицательное влияние на окружающую среду (выбросы, сбросы, шумовое и тепловое воздействие), трудозатраты, а также стремление к «безлюдному производству» путем компьютеризации и роботизации. Все это в комплексе позволяет получить повышенную экономическую эффективность, укрупненную окупаемость инвестиций и максимальный объем продаж на одного работающего, по сравнению с предприятиями «старой» металлургии. Последний показатель стимулирует выпуск более дорогой высокотехнологичной металлопродукции с высокой добавленной стоимостью, использование наукоемких технологий и дополнительных переделов вплоть до выпуска продукции смежных отраслей.

Малая производительность и ориентация на локальный рынок не являются характерными признаками современных мини-заводов. Они завоевывают все новые сегменты стального рынка, включая растущий быстро рынок плоского проката, являющийся продукцией глобального рынка. В этой связи мини-заводы уже не рассматриваются только в качестве локальных металлургических производств с укороченным технологическим циклом, поскольку могут быть спроектированы как интегрированные металлургические заводы, работающие на первородной шихте, сохраняя при этом все преимущества мини-заводов. По мнению «ДАНИЭЛИ», приемлемая окупаемость инвестиций в строительство мини-заводов последних поколений достигается при годовой производительности не менее 300 тыс. т, верхняя планка составляет 2 млн т в год на одну линию ДСП (дугосталеплавильная печь)–ПК (печь-ковш)–МНЛЗ-прокат и ограничена возможностями металлургических агрегатов.

Г-н Лука Моттес представил семинару описание технических и планировочных решений мини-заводов фирмы «ДАНИЭЛИ», построенных по всему миру за последние годы. В таблице приведен краткий референс-лист некоторых из них.

В 1987–1990 гг. в бывшем СССР «ДАНИЭЛИ» построила «под ключ» электросталеплавильный комплекс на заводе утяжеленных и бурильных труб — НПО им. Фрунзе в г. Сумы (Украина), где впервые реализовались многие решения, принятые в концепции современных мини-заводов. На момент пуска это была самая передовая в мире технологическая линия ДСП–ПК–вакууматор–МНЛЗ. В настоящее время «ДАНИЭЛИ» строит на Серовском металлургическом заводе линию ДСП–ПК годовой производительностью 800 тыс. жидкой стали с финансированием через Европейский банк.




**Мини-заводы фирмы «ДАНИЕЛИ» (по материалам презентации фирмы «DANIELI Centro Met» на семинаре «Мини-заводы нового поколения»)**

Завод	Страна	Производительность, т/ч	Масса металла на выпуске из ДСП, т	Диаметр корпуса ДСП, мм	Время плавки (от выпуска до выпуска), мин	Мощность трансформатора, МВ·А
Al Ezz	Египет	126	99	5800	47	85 + 10 %
Sovel	Греция	133	100	6100	45	80 + 20 %
Duferco La Louviere	Бельгия	144	91	6400	38	100 (ДСП постоянного тока)
SN Logos	Португалия	133	120	6500	54	100 + 20 %
Aceralia Redondos Azpeitia	Испания	176	130... 140	6500	52	110 + 12 %
Belgo Minera Piracicaba	Бразилия	156	130	6800	50	102 + 20 %
Thy Marcinelles	Бельгия	180	150	7000	50	120 + 20 %
ADA	Франция	166	150... 180	7000	65	110 + 12 %

Сталеплавильное производство быстро развивается в результате конкуренции на основе инноваций и возрастающих экологических требований. Мировые лидеры усиливают инновационную активность в ожидании выхода Китая на глобальный рынок металлопродукции и металлургических технологий и оборудования. Единственная возможность удержать свои позиции на этом рынке заключается в создании и скорейшем использовании последних технологических достижений. С июня 1999 г. по июнь 2004 г. фирмой «ДАНИЕЛИ» получено 102 патента для защиты своих новаторских технических решений, связанных с мини-заводами нового поколения.

Среди наиболее передовых упомянута так называемая технология «Спулер» — совмещенный и непрерывный процесс разлива, сортовой прокатки и намотки на барабан арматуры диаметром до 32 мм с получением катушки диаметром до 1920 мм. Впервые ее использовали на металлургическом заводе Петтини. Здесь же непрерывную нить арматуры сваривают на автоматических агрегатах в объемные арматурные решетки, которые металлургический завод продает строительным компаниям для армирования железобетона. В настоящее время технологию «Спулер» используют еще на пяти металлургических заводах, что позволяет им выходить на рынок не только с арматурой, но и с продукцией с более высокой добавленной стоимостью — арматурными решетками.

Технология «Спулер» — типичный пример совместной инновационной активности металлургов и машиностроителей в стремлении создать новые рыночные ниши и быть впереди конкурентов, что выражается в усилении фирмой «ДАНИЕЛИ» внимания к НИОКР, бюджет которых в 2004 г. составил на «DANIELI Centro Met» 30 млн евро. Исследования проводят и специальное научное подразделение фирмы, и по контрактам с фирмой университета Италии, США, Китая. Г-н Лука Моттес заявил, что готов рассмотреть возможности подобных контрактов с российскими вузами.

Помимо собственных исследований, фирма «ДАНИЕЛИ» готова использовать на своих мини-заводах инновационные технологии других фирм, в частности плавку по технологии «flat bath» с непрерывной загрузкой металлошихты в расплавленный металл по типу процесса Consteel компании «Текинг», когда дуга в течение всей плавки стабильно горит на «плоском» зеркале жидкой ванны: тонкослябовую непрерывную разливку по технологии фирмы «Арведи» и «революционную», по оценке фирмы, технологию Castrip разливку тонкой полосы на двухвалковом модуле, впервые реализованную в промышленном масштабе американской корпорацией «Нюкор» — мировым лидером по созданию металлургии

XXI века, которая уже появляется на «развалинах» устаревших, малоэффективных и экологически «грязных» металлургических комбинатов.

По мнению г-на Бенедетти, президента «ДАНИЕЛИ», в современной металлургии «бал правят» King and Queen (король и королева), где King — стоимость, а Queen — качество, т. е. технократический подход к развитию металлургии все активнее меняется на инновационно-инвестиционный.

Презентация фирмы «ДАНИЕЛИ» вызвала оживленное обсуждение участников семинара, констатировавших, что сегодня в России нет ни одного современного мини-завода. Однако в недалеком будущем они появятся как на старых площадках в результате реконструкции старых производств (например, Ревдинский мини-завод на двух площадках Нижне-Сергинского метизно-металлургического завода), так и на нескольких новых площадках в Самарской, Нижегородской, Ростовской и Калужской областях. Эти заводы планирует строить корпорация «ФАИ» для компании «Металлургический холдинг», крупного металлотрейдера, второго в России по объему продаж металлолома. На деньги правительства Москвы по российским проектам и с использованием оборудования российского производства в 2005 г. начинается строительство мини-завода в г. Ярцево Смоленской области. Генеральный проектировщик завода — ОАО «ВНИИМЕТМАШ».

Последние мировые тенденции в сфере электросталеплавильного производства — это строительство так называемых маркет-милл (мини-заводов, производящих и сортовой, и плоский прокат по новейшим технологиям). Такие заводы могут полностью отвечать потребностям рынка в сортовом и плоском прокате. Наиболее известными являются электросталеплавильные мини-заводы Герлафинген, Швейцария; ABS, Италия; BSW, Германия; Хилса, Мексика; Кроуфордсвилл, США.

С учетом актуальности рассмотренных вопросов для развития металлургии на основе инноваций научным руководством постоянного семинара по электроплавке и электропечам принято решение провести подробные семинары по мини-заводам нового поколения для металлургических предприятий Урало-Сибирского региона и Украины.

*В. Д. Смоляренко*

ОАО «ВНИИЭТО», Москва, РФ

Поступила 31.05.2005



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



25–27 мая 2005 г. в пгт Ворзель по инициативе Совета научной молодежи Института электросварки им. Е. О. Патона состоялась III Всеукраинская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии». Уже стало традицией каждые два года, в конце весны, на базе кардиологического санатория «Ворзель» собираться лучшим представителям научной молодежи Украины в области сварки. В этом году на конференции заявлено 112 докладов молодых ученых и специалистов (в том числе 69 от сотрудников Института электросварки им. Е. О. Патона), представлявших 18 научных, учебных организаций и предприятий из 12 городов. В работе конференции приняли участие около 80 человек.

Институт электросварки им. Е. О. Патона приложил все усилия, чтобы конференция прошла на высоком организационном и техническом уровне. К открытию конференции изданы сборник трудов и программа работы.

25 мая в 11.00 состоялось торжественное открытие конференции. С приветствием выступил заместитель директора Института электросварки им. Е. О. Патона, академик НАН Украины Л. М. Лобанов. Он отметил важность и актуальность проведения таких конференций, необходимость привлечения молодых кадров в науку, а также развития их творческого и интеллектуального потенциала.

В течение трех дней заслушано 75 докладов, значительная часть которых вызвала оживленные дискуссии в зале. Презентация большинства докладов (более 80%)



выполнена с использованием компьютерной техники на мультимедийном проекторе. Иллюстративный материал представлен на прозрачных пленках как в черно-белом, так и в цветном изображении. В целом можно отметить возросший научный и демонстрационный уровень конференции.

Впервые участницей конференции была представительница России — Н. С. Горячева (Московский институт стали и сплавов).

Другим сюрпризом стало появление докладов на английском языке. Приятно отметить, что зачинателем выступил представитель Института электросварки им. Е. О. Патона Е. К. Кузмич-Янчук. Надеемся, что в дальнейшем количество докладов на иностранных языках увеличится.

Следует отметить выступления молодых участников из НТУУ «КПИ», Украинской инженерно-педагогической академии, а также традиционно сильные работы из Черниговского ГТУ, НУК им. Макарова, ФТИМС.

В представленных на конференции докладах охвачены следующие направления:

прогрессивные технологии сварки и соединения материалов;

прочность, надежность и долговечность сварных конструкций;

технологии наплавки, нанесения покрытий и обработки поверхностей;

процессы спецэлектротехнологии;

новые конструкционные материалы;

математическое моделирование в сварке;

автоматизация процессов сварки и родственных технологий;

фундаментальные исследования физико-химических процессов.

На закрытии конференции состоялось вручение премий победителям. С учетом возросшего уровня представленных докладов оргкомитет принял решение увеличить количество призовых мест. Авторы лучших докладов награждены дипломами I, II, III степени, а также денежными премиями. Спонсорскую помощь оказал НТК «ИЭС им. Е. О. Патона».

Диплом I степени вручен Войнаровичу Сергею Григорьевичу (Институт электросварки им. Е. О. Патона) — «Микроплазменное напыление покрытия из оксида циркония».

Дипломы II степени получили Савицкий Виктор Владимирович (Институт электросварки им. Е. О. Патона) — «Определение остаточных напряжений на основе использования методов конечных элементов и электронной спекл-интерферометрии»; Прибытько Ирина Александровна (Черниговский ГТУ) — «Проектирование сварных узлов датчиков давления».

Дипломами III степени отмечены Кузмич-Янчук Евгений Карлович (Институт электросварки им. Е. О. Патона) — «Suspension plasma spraying of bioceramic coatings»; Половецкий Евгений Викторович (Институт электросварки им. Е. О. Патона) — «Закономерности формирования структуры соединений титана со сталью, полученных сваркой взрывом»; Лабарткава Андрей Владимирович (НУК им. Макарова) — «Влияние дефектов на напряженно-деформированное состояние паяных соединений из разнородных материалов»; Кункин Дмитрий



Дмитриевич (Институт электросварки им. Е. О. Патона) — «Резонансное джерело для зварювання модульованым струмом».

Следует отметить большую работу по подготовке и проведению конференции членов оргкомитета С. Н. Степанюка (отд. № 10), С. Г. Григоренко (отд. № 22), С. Г. Войнаревича (отд. № 73), В. Е. Федорчука (отд. № 7), А. Б. Лесного (отд. № 34), В. В. Савицкого (отд. № 8), А. В. Лавренюка (отд. № 43), а также огромную поддержку ученого секретаря Института электросварки им. Е. О. Патона Л. С. Киреева.

Оргкомитет выражает благодарность за техническую и организационную помощь в проведении молодежной конференции Технопарку «ИЭС им. Е. О. Патона» (А. А. Мазур) и следующим отделам института: № 7



(А. Я. Ищенко), № 8 (Л. М. Лобанов), № 9 (Л. Б. Медовар), № 10 (И. К. Походня), № 22 (Г. М. Григоренко).

Отдельно хочется поблагодарить главного врача санатория «Ворзель» Тамилу Гавриловну Руденко за доброжелательное отношение и всестороннюю помощь в проведении конференции. Отличные условия проживания и благоустроенная территория санатория способствовали не только плодотворной работе, но и полноценному отдыху участников конференции.

*С. Г. Войнаревич, С. Г. Григоренко*

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

Поступила 21.06.2005

## ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

**Бердникова Е. Н. "Особенности массопереноса и фазообразования в зоне взаимодействия разнородных металлов при сварке давлением с импульсным нагружением".** Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов». — Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, 2005. Дата защиты 26 мая 2005 г.

Диссертация посвящена исследованию микромеханизмов пластической деформации, особенностей массопереноса и характера фазообразования в зоне контакта свариваемых разнородных металлов в условиях высоких скоростей сварочного деформирования ( $\dot{\epsilon} \sim 1 \cdot 10^2 \dots 1 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$ ) при сварке давлением. Получены экспериментальные данные, отражающие структурные изменения в зоне контакта разнородных соединений (алюминий–железо, стали; алюминий–медь и др.) при различных способах сварки давлением: ударной ( $\dot{\epsilon} \sim 1 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$ ), магнитно-импульсной ( $\dot{\epsilon} \sim 1 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$ ) и взрывом ( $\dot{\epsilon} \sim 1 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$ ).

Установлено влияние скорости сварочного деформирования на изменение основных параметров локализованной в области контакта пластической деформации (глубины и степени деформации), возрастающих при увеличении скорости сварочного нагружения. Показано, что, кроме скорости деформирования при сварке давлением разнородных материалов, на степень локализованной деформации и изменение механизмов деформации (от дислокационных до сдвиговых и поворотных) влияет показатель подвижности дефектов кристаллической решетки — энергия дефектов упаковки.

Установлено, что в зоне контакта разнородных металлов при высоких скоростях нагружения увеличиваются (до 300 мкм) глубина зоны массопереноса и зона фазообразования, для которой характерно диспергирование образующихся интерметаллидных фаз (до 0,03...0,1 мкм) при достаточно равномерном их распределении.

Изложен метод аналитической оценки свойств сварных соединений, основанный на учёте конкретного вклада структуры металла в зоне сварки, позволяющий оптимизировать прочность и пластичность, а также нивелировать градиент свойств в разнородных сварных соединениях.

Приведена оценка основных свойств прочности и пластичности (предела текучести  $\sigma_T$ , временного сопротивления  $\sigma_b$ , и коэффициента интенсивности напряжений  $K_{1c}$ ) для соединений СтЗ с алюминием, выполненных диффузионной сваркой в вакууме, сваркой трением и взрывом ( $\dot{\epsilon}_{св} \sim 1 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$ ), что позволило выявить влияние конкретных структурных параметров на механические свойства сварных соединений.

Показано, что при высокоскоростных режимах сварки взрывом формирование дисперсных интерметаллидных фаз, равномерно распределенных по зоне сварки, способствует формированию дисперсионно-упрочнённой структуры в объёме менее прочного металла (алюминия). При этом существенно снижается градиент механических свойств в зоне контакта соединений.

Разработанные методики количественной оценки механических характеристик прочности и пластичности по конкретным структурным параметрам для различных условий сварки давлением позволяют выявлять структурные факторы, оказывающие основное влияние на изменение механических свойств, и прогнозировать качество сварных соединений при формировании в зоне сварки структур различного типа.

