

**РЕДАКЦИОННАЯ  
КОЛЛЕГИЯ:**

Главный редактор  
**Б. Е. Патон**

М. И. Гасик,  
Г. М. Григоренко  
(зам. гл. ред.),  
Д. М. Дяченко (отв. секр.),  
М. Л. Жадкевич,  
В. И. Лакомский, Л. Б. Медовар,  
Б. А. Мовчан, А. Н. Петрунько,  
А. С. Письменный, Н. П. Тригуб,  
А. А. Троянский, А. И. Устинов,  
В. А. Шаповалов

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

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

**Адрес редакции:**

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

**Редактор:**

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

Свидетельство  
о государственной регистрации  
КВ 6185 от 31.05.2002

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

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

**СОДЕРЖАНИЕ**

<i>Е. О. Патон — выдающийся ученый, педагог, организатор науки и производства (К 140-летию со дня рождения).....</i>	3
<i>Журналу «Современная электрометаллургия» — 25! .....</i>	7
<b>ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ</b>	
<b>Медовар Л. Б., Саенко В. Я., Рябинин В. А.</b> Выбор флюсов для ДШП при получении титановых слитков.....	8
<b>Скрипник С. В.</b> Особенности оборудования для непрерывного производства центробежных электрошлаковых отливок.....	12
<b>ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ</b>	
<b>Дереча А. Я., Собко-Нестерук О. Е., Сухин С. А.</b> Производство титановых слитков и слэбов способом ЭЛП на установках, разработанных в МК «Антарес» .....	15
<b>Дабига Е. В., Лещук А. А., Бондарь И. В., Борисова Н. Н.</b> Эрозионностойкие многослойные покрытия на основе карбида и нитрида титана с пластичными прослойками.....	20
<b>Устинов А. И., Зиньковский А. П., Токарь И. Г., Скородзиевский В. С.</b> О возможностях наноструктурированных покрытий для снижения динамической напряженности конструктивных элементов машин .....	28
<b>Мушегян В. О.</b> Электронно-лучевая установка для плавки молибдена.....	34
<b>ВАКУУМНО-ИНДУКЦИОННАЯ ПЛАВКА</b>	
<b>Шаповалов В. А., Биктагиров Ф. К., Игнатов А. П., Колесниченко В. И., Карусевич О. В., Никитенко Ю. А., Якуша В. В., Гнатышенко А. В., Гниздыло А. Н.</b> Плавно-разливочный ковш с индукционным нагревом .....	37
<b>ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТАЛЛУРГИИ</b>	
<b>Запорожец Т. В., Гусак А. М., Устинов А. И.</b> Моделирование стационарного режима реакции СВС в нанослойных материалах (Феноменологическая модель). 1. Одностадийная реакция .....	40
<b>ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ СТАЛИ И ФЕРРОСПЛАВОВ</b>	
<b>Корзун Е. Л., Пономаренко А. Г., Кодак А. В., Юденков Е. М.</b> О влиянии технологических факторов на содержание азота в стали, выплавляемой в сверхмощной дуговой печи.....	47
<b>ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ</b>	
<b>Листопад Д. А., Червоний И. Ф.</b> Периодическая подача порций магния при магнийтермическом восстановлении $TiCl_4$ .....	51
<b>ИНФОРМАЦИЯ</b>	
<b>Григоренко С. Г.</b> Встреча представителей советов научной молодежи институтов НАН Украины .....	61
<b>Касаткин О. Г., Липодаев В. Н.</b> Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин (итоговая научная конференция в ИЭС им. Е. О. Патона) .....	62
Диссертации на соискание ученой степени.....	65
Календарь выставок и конференций на 2010 г. ....	67

**ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ**

ГП «Научно-производственный центр «ТИТАН»

КП «Запорожский титано-магниевого комбинат»

ООО «Международная компания «АНТАРЕС»

Научно-производственное предприятие «ЭЛТЕХМАШ»

**SOVREMENNAYA  
ELEKTROMETALLURGIYA**  
(*Electrometallurgy Today*)

**№ 1 (98)**  
**2010**

Published since January, 1985

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

**Publisher:** *International Association «Welding»*

Is published 4 times a year

**EDITORIAL BOARD:**

Editor-in-Chief

**B. E. Paton**

M. I. Gasik,

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

**THE INTERNATIONAL  
EDITORIAL COUNCIL:**

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

**Address:**

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

**Editor:**

V. I. Kotlyar  
Electron galley:

D. M. Dyachenko, L. N. Gerasimenko  
State Registration Certificate  
KV 6185 of 31.05.2002

All rights reserved.

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

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

**CONTENTS**

*E. O. Paton — outstanding scientist, teacher, organizer of research  
and production (To the 140<sup>th</sup> birthday anniversary)..... 3*  
*«Sovremennaya Elektrometallurgiya» journal is 25!..... 7*

**ELECTROSLAG TECHNOLOGY**

**Medovar L. B., Saenko V. Ya., Ryabinin V. A.** Selection of fluxes  
for ASR in producing titanium ingots ..... 8  
**Scripnik S. V.** Peculiar features of equipment for continuous  
production of centrifugal electroslag castings..... 12

**ELECTRON BEAM PROCESSES**

**Derecha A. Ya., Sobko-Nesteruk O. E., Sukhin S. A.** Production  
of titanium ingots and slabs by EBM method in units designed at IC  
«Antares»..... 15

**Dabizha E. V., Leshchuk A. A., Bondar I. V., Borisova N. N.**  
Erosion-resistant multi-layer coatings on base of carbide and  
titanium nitride with ductile interlayers ..... 20

**Ustinov A. I., Zinkovsky A. P., Tokar I. G., Skorodzievsky V. S.**  
About capabilities of nanostructured coatings to reduce the  
dynamic intensity of design elements of machines..... 28

**Mushegyan V. O.** Electron beam installation for molybdenum  
melting ..... 34

**VACUUM-INDUCTION MELTING**

**Shapovalov V. A., Biktagirov F. K., Ignatov A. P.,  
Kolishchenko V. I., Karuskevich O. V., Nikitenko Yu. A.,  
Yakusha V. V., Gnatushenko A. V., Gnizdylo A. N.**  
Melting-pouring ladle with induction heating ..... 37

**GENERAL PROBLEMS OF METALLURGY**

**Zaporozhets T. V., Gusak A. M., Ustinov A. I.** Modeling of  
stationary mode of SHS reaction in nanolayer materials  
(phenomenological model). 1. Single-stage reaction ..... 40

**ELECTROMETALLURGY OF STEEL AND FERROALLOYS**

**Korzun E. L., Ponomarenko A. G., Kodak A. V., Yudenkov E. M.**  
About the effect of technological factors on nitrogen content in  
steel melted in super-powerful arc furnace..... 47

**ENERGY-AND RESOURCES SAVING**

**Listopad L. A., Chervonnyi I. F.** Periodic feeding of magnesium  
portions in magnesium thermal reduction of TiCl<sub>4</sub>..... 51

**INFORMATION**

**Grigorenko S. G.** Meeting of representatives of unions of young  
scientists of institutes of the NAS of Ukraine ..... 61

**Kasatkin O. G., Lipodaev V. N.** Problems of residual life and safe  
service of structures, constructions and machines ( Final Scientific  
Conference at the E. O. Paton Electric Welding Institute of NASU) ..... 62

Theses for scientific degree ..... 65

Calendar, exhibitions and conferences for 2010 ..... 67

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

## **Е. О. ПАТОН — ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЕНЫЙ, ПЕДАГОГ, ОРГАНИЗАТОР НАУКИ И ПРОИЗВОДСТВА**

Евгений Оскарович Патон родился 5 марта 1870 г. в Ницце (Франция) в семье русского консула. Среднее образование получил в гимназии г. Бреслау (Германия), где наряду с фундаментальной подготовкой по точным наукам в совершенстве овладел немецким, французским и английским языками. В 1888 г. поступил на инженерно-строительный факультет Королевской Саксонской технической академии (ныне Технический университет Дрездена), который блестяще закончил в 1894 г. По окончании ему было предложено место ассистента в институте. Но молодой инженер, воспитанный в семье в духе патриотизма, твердо решил отдать все силы служению родной стране и в 1895 г. навсегда переезжает в Россию.

Для получения прав на инженерную деятельность в России Е. О. Патон в том же году поступает на 5-й курс Петербургского института инженеров путей сообщения, в течение восьми месяцев сдает 12 экзаменов, выполняет несколько проектов и уже в мае 1896 г. получает диплом русского инженера. По окончании института Евгений Оскарович начал работать ассистентом того же института под руководством проф. Ф. С. Ясинского и в техническом отделе службы пути Николаевской железной дороги. Талантливый профессор оказал большое влияние на молодого специалиста. Уже в следующем, 1897 г., Е. О. Патон начинает педагогическую деятельность в только что организованном Московском инженерном училище путей сообщения.

Здесь он встретился с профессорами Л. Д. Проскураковым, Л. Ф. Николаи, Н. А. Белелюбским, М. Н. Герсевановым, совместная работа с которыми благотворно повлияла на формирование молодого ученого.

В возрасте 31 год он защитил диссертацию, получил степень адъюнкта и был назначен профессором училища. Московскому инженерному училищу Евгений Оскарович Патон отдал семь лет. В эти годы он выработал свою методiku преподавания, началась его многолетняя работа над созданием учебников и учебных пособий по мостостроению. Он составил для себя жесткий распорядок дня, который начинался в шесть часов утра, и неукоснительно придерживался его всю жизнь.

Е. О. Патон постоянно работал над собой, тщательно готовился к лекциям, был очень требователен к студентам. Напряженно работал над созданием курсов мостов, скрупулезно обрабатывал массу материалов, многократно проверял и уточнял расчеты. За короткое время вышли из печати два тома курса по железным мостам и примеры расчетов деревянных, железных и каменных мостов. Имя молодого профессора-мостовика Е. О. Патона получило широкую известность, его книги быстро расходились.

В 1904 г. Киевский политехнический институт пригласил молодого профессора возглавить кафедру мостов. Вскоре Евгений Оскарович был избран деканом инженерно-строительного отделения того же института. С большой энергией он взялся за создание музея и кабинета мостов со специальной библиотекой. Помимо преподавания, Евгений Оскарович и здесь отдавал много сил созданию учебников, проектированию и строительству мостов. Под его руководством были построены мост в г. Тбилиси, два моста через реку Рось, киевский пешеходный мост над Петровской аллеей, перекрытия залов КПИ и гостиницы «Метрополь» в г. Москве и др.

В годы Первой мировой войны Е. О. Патон энергично взялся за проектирование мостов по заданию военного ведомства. Была создана оригинальная конструкция разборных мостов, названных мостами Патона и получивших широкое применение для военных целей.

В 1918 г. Евгений Оскарович издает руководство «Восстановление мостов», работает над проектированием новых мостов. В 1920 г. он организовал Киевскую мостоиспытательную станцию НКПС и десять лет руководил ею. За эти годы под руководством и при личном

---

участии Е. О. Патона были проверены и испытаны около 150 мостов разных систем в Украине, Беларуси, Поволжье и Казахстане. Е. О. Патонем собран обширный фактический материал, который использовался в учебной и проектной работе.

В 1920 г. белополяки, отступая, взорвали красивейшее сооружение города — цепной мост через Днепр в Киеве. В 1922 г. Е. О. Патон берется за воссоздание моста, вкладывая всю свою неукротимую энергию в это дело. Евгений Оскарович был не только автором оригинального проекта, но и организатором строительства. Благодаря его изобретательности, умению решать самые сложные задачи и упорно преодолевать трудности мост, которому было присвоено имя Евгении Бош, начал функционировать в июне 1925 г.

В 1925–1929 гг. Е. О. Патон интенсивно работал над проектированием новых мостов, участвовал во всесоюзных и международных конкурсах, заслуженно получая высокие оценки и первые премии. В целом около 35 лет научной, инженерной и педагогической деятельности Евгений Оскарович отдал мостостроению, создал проекты 40 мостов, опубликовал свыше 160 научных работ по различным вопросам мостостроения. Многие его ученики стали известными учеными и инженерами, руководителями производств. Избрание Е. О. Патона академиком ВУАН в 1929 г. было вполне заслуженным. Е. О. Патон не без основания считается основателем школы мостостроения в Украине.

В проектировании железных мостов к тому времени были достигнуты значительные успехи, но процесс их изготовления оставался весьма трудоемким и несовершенным. Это побудило Е. О. Патона к поиску новых технологий. Подготавливая в 1928 г. к переизданию курс «Железные мосты», Евгений Оскарович включает в него раздел по применению сварки в строительстве мостов.

Именно в новом способе соединения металлов — в электросварке — он видит пути коренного улучшения изготовления пролетных строений мостов. И Е. О. Патон принимает смелое и дальновидное решение — заняться сваркой, базируясь на основах металлургии, металловедения, электротехники и физики, т. е. на новых для мостостроителя вопросах.

Начинать пришлось на голом месте: не было ни оборудования, ни знающих людей, ни помещения. Четыре сотрудника и три комнаты в подвале — вот что представляла собой первоначально электросварочная лаборатория ВУАН. Затем на общественных началах был создан Электросварочный комитет при ВУАН, организатором и бессменным председателем которого был Е. О. Патон. На этой скромной базе развернулась интенсивная работа по исследованию прочности сварных конструкций, пропаганде и внедрению электросварки в промышленности, на транспорте и в строительстве. Уже на этом этапе Е. О. Патон выдвинул идею создания специализированного научно-исследовательского учреждения для решения всех задач, возникающих на пути развития сварочного производства. В 1933 г. создание такого института было утверждено президиумом ВУАН, а 3 января 1934 г. правительственным постановлением определен официальный статус Института электросварки.

Изначально Е. О. Патон предусмотрел такую организационную структуру института, которая состояла из научно-исследовательских и экспериментально-производственных подразделов, конструкторского бюро и мастерских. Так возник первый в мире специализированный центр по проведению научно-инженерных работ в области сварки, который, в отличие от классических академических организаций, не ограничивался выполнением сугубо фундаментальных исследований, а с самого начала был нацелен на комплексное решение реальных народнохозяйственных проблем: от углубленного теоретического поиска до применения научно-технических результатов в производстве.

В институте расширялась область научных исследований. В первую очередь всесторонне изучались сварные конструкции, их прочность в различных условиях эксплуатации, напряжения и деформации.

В отличие от большинства исследований в Западной Европе, проводившихся на малых лабораторных образцах (что значительно проще и дешевле), Институт электросварки стремился проводить опыты на сварных узлах, балках, фермах, близких к натурным. Это потребовало сооружения больших испытательных установок, но зато давало более точные и надежные результаты.

Исследования сварных конструкций, проводимые институтом, сразу привлекли большое внимание и получили положительную оценку. Вскоре появилось второе важное направление исследований — механизация и автоматизация дуговой сварки. Большой жизненный, научный

---

и производственный опыт подсказал Е. О. Патону, что для успеха нового дела надо сделать очень трудный, но необходимый шаг — механизировать и автоматизировать сварку, заменить руку и мастерство электросварщика сварочным автоматом. Эта задача и сегодня остается актуальной.

Развернутые Е. О. Патоном и его учениками целенаправленные фундаментальные исследования стали теоретической основой науки о сварке, превратили ее в мощный источник технического прогресса, что привело к революционным свершениям во многих отраслях производства. Этому же способствовали вышедшие в свет монографии и статьи сотрудников института. Возникает потребность в подготовленных сварщиках, и Евгений Оскарович организует в 1935 г. кафедру сварки в Киевском политехническом институте.

В предвоенные годы в Институте электросварки успешно велась разработка надежного оборудования для автоматической сварки открытой дугой. Однако на начальном этапе сварщики-стахановцы, работавшие вручную, обгоняли сложные и дорогие дуговые автоматы и по качеству сварки, и по производительности. Всесторонне изучив проблему и сконцентрировав научный потенциал института, Евгений Оскарович совместно с коллективом института создает новый способ дуговой сварки под флюсом. Это позволило в несколько раз увеличить производительность и резко повысить качество сварных швов. Сварка под флюсом стала промышленно надежным, экономически выгодным технологическим процессом и получила полное признание уже в 1940 г. Для широкого внедрения нового способа нужно было разработать автоматы, флюсы, проволоки и в кратчайший срок организовать их производство.

Евгений Оскарович Патон обратился к правительству за помощью. В конце 1940 г. он был вызван в Москву. В короткий срок было подготовлено, а затем и принято правительством постановление о широком внедрении автоматической сварки под флюсом. Постановление предусматривало внедрение нового способа на 20 крупнейших заводах, организацию производства необходимого оборудования, флюсов и проволоки, расширение Института электросварки. Е. О. Патон был назначен государственным советником и членом Совета машиностроения при СНК СССР. Это постановление стало историческим в развитии советской сварочной техники.

В марте 1941 г. Е. О. Патон был удостоен Сталинской премии первой степени за разработку метода и аппаратуры для скоростной автоматической сварки. Огромная энергия Е. О. Патона и всего коллектива Института электросварки обеспечила успешное выполнение постановления правительства. Внедрение сварки под флюсом принимало широкий размах.

Начавшаяся 22 июня 1941 г. Великая Отечественная война стала грозным испытанием для всего Советского Союза. Академия наук УССР и большинство ее институтов были эвакуированы в Уфу. Е. О. Патон обратился к эвакуационной комиссии с просьбой перевести Институт электросварки на Урал. Институт переехал в Нижний Тагил на Уралвагонзавод, ставший арсеналом оружия и боеприпасов для фронта. По настоянию Е. О. Патона, институт принимал непосредственное участие в организации производства бронекорпусов танков, сосредоточив свои силы на внедрении сварки под флюсом в производство вооружения и боеприпасов.

Деятельность Е. О. Патона в годы войны была особенно плодотворной. В сложных условиях он развернул поисковые и конструкторские работы, главной целью которых было создание высокоскоростной автоматической сварки броневых сталей для бронекорпусов танков. В тяжелых условиях военного времени под его руководством сотрудники института впервые в мире решили сложнейшие научные и технические задачи, связанные с автоматической сваркой брони: создали надежную технологию (В. И. Дятлов, Г. М. Слуцкая, Б. И. Иванов), исследовали процессы, проходящие в мощной сварочной дуге, горящей под флюсом (А. М. Макара, Б. Е. Патон), разработали новые сварочные флюсы.

На заводе в рекордные сроки был организован выпуск танков, и уже в январе 1942 г. первые грозные машины Т-34 вышли из его ворот.

В конце 1942 г. институтом были разработаны автоматы с постоянной скоростью подачи электродной проволоки. Положенный в основу этих автоматов принцип саморегулирования сварочной дуги позволил упростить конструкцию и облегчить изготовление и обслуживание автоматов, расширить возможности их применения. Кроме танковых заводов, Институт электросварки внедрял автоматическую сварку на других оборонных предприятиях. Впервые в мире с помощью скоростной автоматической сварки под флюсом было организовано поточ-

---

ное производство фугасных авиабомб, реактивных снарядов для «катюш», а также другого вооружения и боеприпасов для нужд фронта. К концу 1944 г. автоматическая сварка под флюсом применялась уже на 52 заводах.

За успешное внедрение автоматической сварки под флюсом в производство Евгений Оскарович и ряд сотрудников института были награждены орденами СССР. 2 марта 1943 г. Е. О. Патону, первому из украинских академиков, присваивается звание Героя Социалистического Труда за выдающиеся достижения по обеспечению ускоренного производства танков.

Летом 1944 г. Евгений Оскарович возвращается в родной Киев, освобожденный Советской Армией от фашистских оккупантов. С этого времени началась вторая жизнь Института электросварки. Ему было предоставлено здание по улице Горького.

Военные годы закалили и укрепили коллектив института, сохранив его высокую работоспособность и увлеченность делом. Используя разработки уральского периода, институт до конца 1945 г. внедрил автоматическую сварку под флюсом на 12 больших предприятиях. В этом же году институту было присвоено имя его основателя и руководителя.

Под руководством Е. О. Патона институт быстро растет и развивается, разворачиваются обширные научные исследования, осуществляются многочисленные разработки, публикуются сборники и монографии по различным проблемам сварки. Круг вопросов, которыми занимается в эти годы Евгений Оскарович, непрерывно расширяется. К работе по руководству институтом присоединяются все новые общественные и государственные обязанности. Евгений Оскарович избирается вице-президентом Академии наук УССР и отдает много сил ее деятельности. Он дважды избирается депутатом Верховного Совета СССР. Е. О. Патон принимает активное участие в решении государственных дел, проявляет много заботы о своих избирателях. Авторитет и известность Евгения Оскаровича и руководимого им института непрерывно расширяются не только в СССР, но и за рубежом. Институт электросварки по праву занял ведущее положение в мире среди научных учреждений в области сварки. Ни одна страна, даже такая богатая и развитая, как США, не располагает подобным научно-техническим центром.

Особенно близкой темой для Евгения Оскаровича оставались сварные мосты. Несмотря на огромную загрузку, он не переставал заниматься ими, разрабатывая и реализуя идеи, вынашиваемые многие годы.

Венцом многолетних трудов Евгения Оскаровича Патона явилось сооружение цельносварного автодорожного моста через реку Днепр в г. Киеве вместо разрушенного войной моста им. Евгении Бош. Всего лишь около трех месяцев жизни не хватило Е. О. Патону, чтобы увидеть осуществление своей мечты. Торжественное открытие моста, которому было присвоено имя Е. О. Патона, состоялось 5 ноября 1953 г. Мост представляет собой сооружение с пролетным строением большой длины, причем все его элементы, сваренные автоматами на заводе, соединены на монтаже с применением автоматической сварки под флюсом. Мост им. Е. О. Патона и ныне остается одним из крупнейших в мире среди цельносварных мостов. В 2003 г. торжественно отмечено пятидесятилетие моста.

Евгений Оскарович Патон прожил долгую жизнь, заполненную непрерывным и неустанным творчеством. Он отличался редким трудолюбием и необычайной энергией. Большая часть прожитых им дней была занята трудом по 12–14 часов.

Вклад Е. О. Патона в научно-технический прогресс, подготовку инженерных кадров, создание научной школы отмечен орденами Российской империи и орденами СССР, а именно орденами Станислава, Анны, двумя орденами Ленина, Золотой Звездой Героя Социалистического Труда, двумя орденами Трудового Красного Знамени, Отечественной войны I степени и Красной Звезды, ему было присвоено звание заслуженного деятеля науки.

Редколлегия журнала

## **Уважаемые Коллеги! Дорогие Читатели!**

**В**ы держите в руках юбилейный номер нашего журнала. Ровно 35 лет назад увидел свет первый выпуск республиканского межведомственного сборника «Проблемы специальной электрометаллургии», затем 10 лет спустя сборник стал ежеквартальным научно-теоретическим и производственным журналом под тем же названием. С 2003 года журнал называется «Современная электрометаллургия»

Все эти годы бессменным главным редактором издания является инициатор создания журнала академик Борис Евгеньевич Патон. С 1985 года журнал регулярно издается на английском языке под названием «Advances in Electrometallurgy».

По-прежнему в фокусе внимания редколлегии и читателей журнала находится не просто электрометаллургия, а прежде всего, производство сталей и сплавов способами специальной электрометаллургии, т. е. электро-шлаковым, вакуумно- и плазменно-дуговым, электронно-лучевым переплавами, а также примыкающие к специальным способам плавки процессы и материалы покрытий, получаемых электронно-лучевыми и другими процессами. В последние годы редколлегия старается расширить круг публикуемых в журнале статей путем вовлечения материалов, касающихся всего спектра электрометаллургии и, конечно, в первую очередь тех, которые освещают производство наиболее качественных сталей и сплавов.

Одновременно редколлегия планирует увеличить количество публикаций материаловедческого характера, поскольку имеются вполне очевидные свидетельства очередного скачка в понимании природы сталей и сплавов, а также появления новых конструкционных материалов, уже не по внешним признакам, а по сути содержащих приставку нано в своем названии.

Традиционные направления (специальная электрометаллургия, ее материалы и технологии) по-прежнему будут занимать приоритетное место в редакционной политике. И связано это с очередным бумом, который переживают сегодня практически все области специальной электрометаллургии: от печестроения до освоения новых видов продукции, например уникальных 400-тонных слитков ЭШП или 30-тонных слитков ВДП, жаропрочных никелевых суперсплавов для атомной и парогазовой энергетики, а также литых и деформированных интерметаллических конструкционных материалов для двигателей авиационной и космической отрасли.

*Редколлегия поздравляет своих читателей и авторов,  
т. к. это наш общий праздник, дорогие друзья!*



УДК 669.187.56.001.1

## ВЫБОР ФЛЮСОВ ДЛЯ ДШП ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ТИТАНОВЫХ СЛИТКОВ

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

Рассмотрены особенности выбора системы флюсов для получения титановых слитков способом ДШП. Приведены данные экспериментальных плавок ДШП с использованием солевых композиций.

The specifics of selection of flux systems for producing titanium ingots by the ASR method is considered. Data of experimental melts of ASR using salt compositions are given.

**Ключевые слова:** дугошлаковый переплав; флюсовый затвор; шлаковый гарнисаж; фториды щелочноземельных металлов; редкоземельные металлы

В дугошлаковом переплаве (ДШП), разработанном в ИЭС им. Е. О. Патона еще в 1970-х гг. [1], объединяются возможности обработки жидкого металла электрической дугой, горящей в контролируемой газовой атмосфере и в жидком синтетическом шлаке, через который проходит ток в процессе переп-

лава расходоуемого электрода. При этом слой синтетического шлака, покрывающий металлическую ванну, способствует рассредоточению тепла по ее сечению и снижению глубины металлической ванны, делает ее более плоской, чем при вакуумно-дуговом (ВДП) и электрошлаковом переплаве (ЭШП). Кроме того, благодаря образованию шлакового гарнисажа слитки ДШП, в отличие от слитков ВДП, имеют гладкую боковую поверхность, и механическая обработка перед последующим переделом не требуется.

Для реализации способа ДШП применительно к получению титановых слитков следовало обеспечить изоляцию дуги от контакта с воздухом и создать в зоне ее горения контролируемую газовую атмосферу. Необходимо было снизить стоимость титана и его сплавов, сделать их вполне конкурентоспособными с нержавеющими никельсодержащими сталями и сплавами [2, 3].

Опробовали две технологические схемы (рис. 1): ДШП с применением флюсового затвора — простейшего устройства, которое устанавливается непосредственно на верхний торец кристаллизатора; ДШП в камерной печи.

В последнем случае использовали имеющиеся печи вакуумно-дугового переплава с отключенной вакуумной системой, а также специально спроектированные камерные печи для ДШП, позволяющие вести процесс в контролируемой газовой атмосфере.

При ДШП электрическая дуга горит в защитном газе или парах шлака. Присутствие паров шлака,

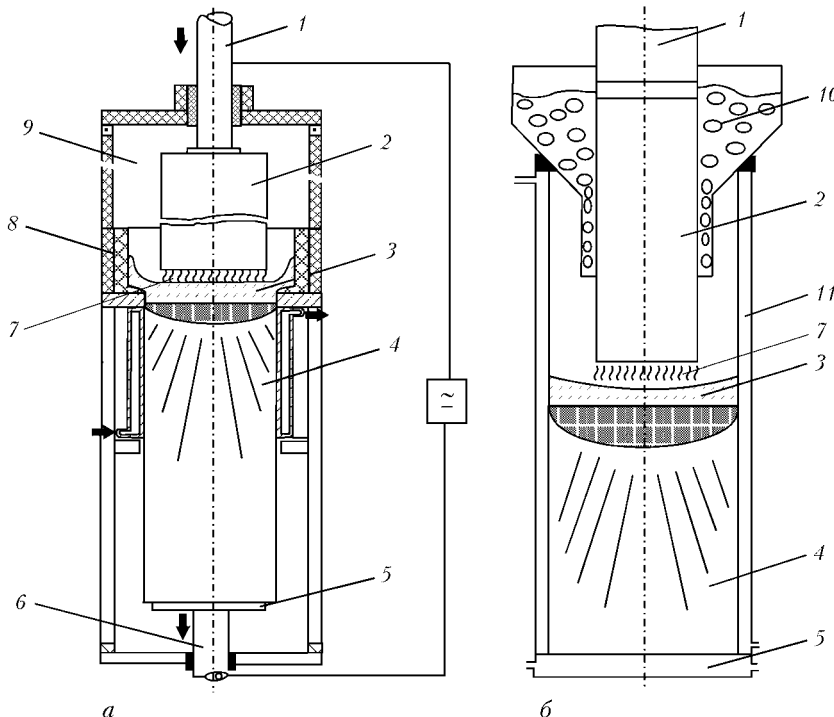


Рис. 1. Технологические схемы реализации ДШП в камерной печи с вытяжкой слитка из короткого кристаллизатора (а) и в обычной печи ЭШП в стационарном кристаллизаторе с применением флюсового затвора (б): 1 — инвентарная головка расходоуемого электрода; 2 — расходоуемый электрод; 3 — шлаковая ванна; 4 — слиток; 5 — водоохлаждаемый поддон; 6 — механизм вытяжки слитка из кристаллизатора; 7 — дуга; 8 — футерованная шлаковая надставка; 9 — камера печи; 10 — флюсовый затвор; 11 — водоохлаждаемый кристаллизатор





в котором имеются химические элементы с низким потенциалом ионизации, способствует стабилизации и устойчивости горения дуги. При ДШП, в отличие от ВДП, металлическая корона на слитке отсутствует. Это объясняется тем, что при ДШП брызги металла (мелкие капли) попадают или в шлаковую ванну, или в борт шлака, находящийся по периметру шлаковой ванны.

Глубина металлической ванны при выплавке слитков способом ДШП меньше, чем при ЭШП, а форма ванны более плоская. Это объясняется тем, что поверхность ванны обогревается более равномерно. Рассредоточению тепла по ванне способствует и перенос капель в ванну несколькими потоками по всему сечению электрода.

При ДШП поверхность жидкой шлаковой ванны является одним из электродов. Шлаковая ванна представляет собой расплав электролита с большим количеством сложных и простых ионов. Ее температура может достигать 2000 °С. Одни компоненты шлака при таких температурах испаряются, другие разлагаются (диссоциируют) на составляющие ионы и таком виде тоже могут участвовать в процессе переноса тока. Однако вследствие того, что температура дугового разряда значительно выше, чем шлаковой ванны, процессы испарения, диссоциации и ионизации выражены здесь намного сильнее.

Необходимо отметить, что компоненты, входящие в состав шлаков ДШП, по-разному воздействуют на условия горения дуги. Положительное влияние оказывают щелочные и щелочно-земельные металлы с низким потенциалом ионизации [4–7]. Они легко ионизируются, образуя катионы и свободные электроны, участвующие затем в переносе заряда.

Для смеси из различных газов и паров, присутствующих при ДШП, суммарный потенциал ионизации определяется компонентом с наименьшим потенциалом ионизации и зависит от его концентрации.

Так, потенциалы ионизации калия, натрия, кальция, аргона равны соответственно 4,33; 5,11; 6,10; 15,7 В. Таким образом, химический состав применяемых флюсов оказывает существенное влияние на электрические характеристики процесса (устойчивость и стабильность горения дуги, уровень пиков зажигания, наличие пауз в кривой тока, напряжение холостого хода источника питания и т. д.).

Присутствие легкоионизируемых элементов в шлаке способствует резкому снижению градиента напряжения в столбе дуги, возрастанию влияния элементов с низким потенциалом ионизации на эффективный потенциал ионизации газовой смеси. Последний стремится к потенциалу наиболее легкоионизируемого элемента в атмосфере дуги.

При ДШП титана используют в основном шлаки ЭШП, содержащие CaF<sub>2</sub> и ряд галогенидов щелочно- и редкоземельных материалов (табл. 1). Роль флюсов при ДШП титана несколько отличается от привычной роли рафинирующего компонента при ЭШП и ДШП стали и сплавов на основе железа. Также практически нивелируется роль шлака как теплоносителя.

Основной зоной выделения энергии является дуга. Проведенные исследования, в том числе в заводских условиях [4], показали, что по сравнению

Таблица 1. Свойства материалов, применяемых для создания флюсовых композиций при ДШП титана [8]

Компонент	Температура, °С		Плотность, г/см <sup>3</sup> , при T, °С		
	плавления	кипения	20	$\frac{1000}{T_{пл}}$	$\frac{1700}{T_{кип}}$
LiCl	606	1382	–	1,50	1,33
LiF	842	1676	1,80	1,73	–
MgF <sub>2</sub>	1263	2227	3,14	–	2,19
CaF <sub>2</sub>	1418	2500	3,20	2,60	2,40
SrCl	868	1950	3,20	2,70	$\frac{2,65}{2,4}$
SrF <sub>2</sub>	1486	2477	4,24	–	3,28
BaCl <sub>2</sub>	958	1560	3,14	3,11	–
BF <sub>2</sub>	1320	2200	4,91	4,22	3,78
NaF	995	1700	1,963	1,96	–
NaCl	800	1440	–	$\frac{1,42}{1,55}$	–
YF <sub>3</sub>	1152	2227	5,07	–	–
LaF <sub>3</sub>	1493	2327	5,94	–	4,43
AlF <sub>3</sub>	1040	1260	–	–	–
Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>	1000	–	–	$\frac{3,036}{3,036}$	–
Ti	1671	3260	4,54	–	4,08

с ЭШП, способ ДШП при выплавке слитков из сталей и сплавов позволяет в 1,5 раза сократить расход электроэнергии, а также почти в 2 раза уменьшить потребление синтетического флюса на 1 т металла.

Основные функции шлака при ДШП титана, помимо стабилизации дуги, заключаются в формировании поверхности, образовании корочки гарнисажа, защите металла от окружающей атмосферы, образовании защитного конденсата, покрывающего расходуемый электрод. При соответствующем подборе флюсовой композиции возможна регенерация шлака.

Для получения однородного по химическому составу электрошлакового металла предназначены флюсы, не содержащие оксидов легковосстановимых элементов хрома, марганца, кремния и др. Наибольшего внимания заслуживают фториды в качестве компонентов флюса. Однако некоторые из них (фториды лития, калия, натрия) имеют высокую проводимость и склонность к образованию комплексных соединений с титаном, хромом, цирконием и т. д.

Ввиду низкой температуры плавления и кипения хлоридов щелочноземельных металлов, которая ни-

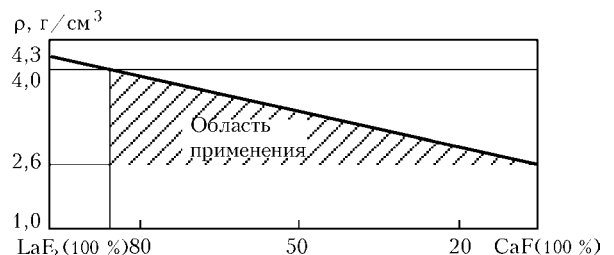


Рис. 2. Область применения флюса на основе соединений ФРЗМ и CaF<sub>2</sub> для процесса ДШП



Рис. 3. Флюсовый затвор с устройством для продувки аргоном

же, чем у аналогичных фторидов, большинство из них не могут быть взяты за основу флюса при ДШП. Кроме того, часть из них (например хлористый кальций) имеет склонность к гидратации [8]. Свойства соединений, входящих во флюсы, представлены в табл. 1.

Наименее химически активными по отношению к расплавленному металлу и наиболее простыми по строению являются солевые шлаки. Они не содержат оксидов, загрязняющих металл неметаллическими включениями и окисляющих его.

Б. И. Медовар совместно с С. М. Гуревичем в середине 1950-х гг. в впервые в мире предложили и использовали для сварки высоколегированных сталей флюсы галоидного типа, не содержащие в

своем составе окислительных соединений [3]. Температура кипения флюса должна быть достаточно высокой (не ниже  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), чтобы шлаки можно было перегреть выше температуры плавления титана. Основой этих флюсов служил  $\text{CaF}_2$ .

Один из первых сварочных флюсов на основе  $\text{CaF}_2$  назван АНФ-1, т. е. измельченный до необходимого размера зерен и прокаленный при высокой температуре плавиловый шпат. Подобные флюсы за рубежом появились и нашли применение лишь много лет спустя. Практически сразу же фторидные флюсы получили применение и при ЭШП сталей, легированных легкоокисляющимися элементами. Экспериментальные исследования ИЭС им. Е. О. Патона показали, что флюс для ЭШП титана может быть составлен на основе особо чистых тугоплавких фторидов щелочноземельных металлов: фтористого кальция, фтористого стронция и фтористого бария [5], а также фторидов редкоземельных металлов (ФРЗМ) на основе  $\text{LaF}_3$ . Фториды щелочноземельных металлов характеризуются высокими значениями температуры плавления (более  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и кипения (свыше  $2200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). В экспериментальных условиях при ДШП титана опробованы флюсы, составленные на основе  $\text{CaF}_2$ :  $\text{CaF}_2$  — ФРЗМ;  $\text{CaF}_2$ – $\text{BaF}_2$ – $\text{CaCl}_2$ ;  $\text{CaF}_2$ – $\text{BaF}_2$ – $\text{CaCl}_2$ – $\text{SrF}_2$ . Они успешно применялись и для получения титановых слитков ДШП.

Новые возможности для получения бездефектных титановых слитков способом ДШП открываются в результате создания нового технологического процесса, разработанного на основе использования токопроводящего кристаллизатора в сочетании с активными шлаками, содержащими металлургический кальций. Это позволяет более полно растворять в процессе переплава твердые высокоазотистые включения, если таковые они окажутся в расходимых электродах.

Однако реализовать данный технологический процесс, согласно работе [5], можно только в камерной печи с контролируемой атмосферой и применением новых флюсовых композиций, поскольку при этом появляются проблемы, связанные с вытяжкой слитка, кроме того, — новые требования к применяемым флюсам. Новые данные о применении камерных печей при получении титановых слитков представлены в работах [6, 7].

При использовании ФРЗМ в качестве компонентов флюса требуется точный расчет плотности получаемых шлаковых композиций, в противном случае плотность шлака превысит плотность металла. Номограмма для использования ФРЗМ и фторида кальция представлена на рис. 2. Для ее построения использовались данные исследований, проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона с применением ФРЗМ при изготовлении титанового слитка ДШП.

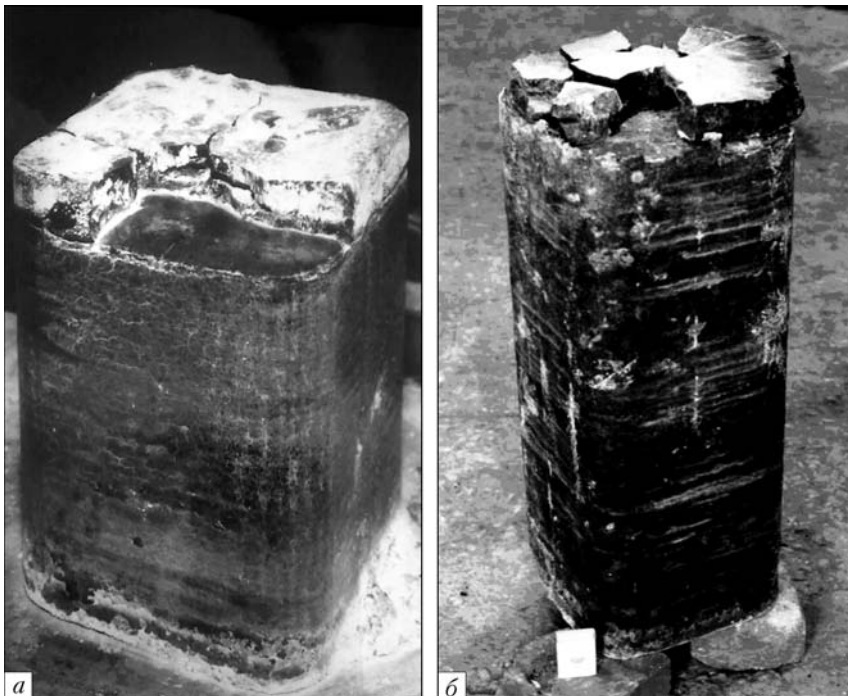


Рис. 4. Титановые слитки ДШП из титана ВТ1-0 квадратного сечения  $200 \times 200$  мм, выплавленные под флюсами  $\text{CaF}_2$  (а) и  $\text{CaF}_2$  + ФРЗМ (б)



Таблица 2. Результаты ДШП титана ВТ1-0 в кристаллизаторе квадратного сечения 200×200 мм с флюсовым затвором

№ плавки	Электрический режим плавки		Флюс	[O], %			[N], %			Твердость, НВ		
	I, кА	U, В		Низ	Середина	Верх	Низ	Середина	Верх	Низ	Середина	Верх
1	3,0	98	CaF <sub>2</sub>	0,097	0,08	0,12	0,021	0,024	0,025	133	135	139
2	2,5	100	CaF <sub>2</sub> + ФРЗМ (30 %)	0,099	0,10	0,11	0,030	0,030	0,035	151	152	157

Примечание. Согласно требованию ГОСТ 19807-77 содержание кислорода в ВТ1-0 составляет ≤0,12 %.

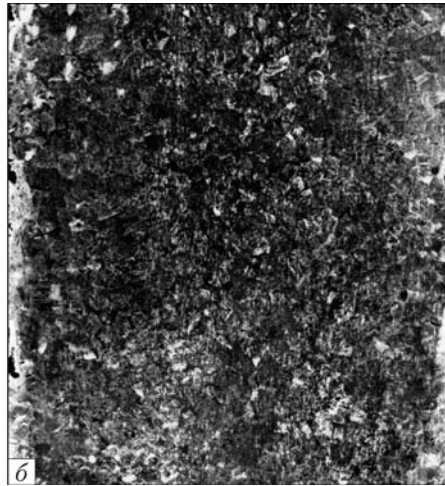


Рис. 5. Темплеты слитка ДШП из титана марки ВТ1-0 с применением флюсов CaF<sub>2</sub> (а) и CaF<sub>2</sub> + ФРЗМ (30 %) (б)

Рис. 6. Торцы расходуемого электрода диаметром 100 мм марки ВТ1-0 после плавки →



Способом ДШП получили опытно-промышленную партию слитков из титана марки ВТ1-0 с применением новых шлаковых композиций. ДШП выполняли в печи Р-951 с использованием стационарных кристаллизаторов квадратного сечения 200×200 мм с флюсовым затвором. Заливку флюса проводили через сифон. Для защиты плавильной зоны применяли флюсовый затвор и продувку аргоном (рис. 3). Слитки после обивки шлакового гарнисажа имели хорошую поверхность. Внешний вид выплавленных слитков ДШП приведен на рис. 4. Результаты химического анализа полученного металла представлены в табл. 2.

Твердость НВ металла ДШП, выплавленного с применением флюса с добавлением ФРЗМ, выше, чем такового с использованием чистого CaF<sub>2</sub>, по-видимому, из-за легирования титана редкоземельными металлами в результате восстановления их из шлака в процессе ДШП.

На рис. 5 приведены фрагменты продольных макрошлифов верхней части слитков ДШП, выплавленных в соответствии с технологическим режимом плавки № 1 и 2, а также внешний вид конца расходуемого электрода после окончания плавки. Плавление электрода характеризуется ярко выраженным равномерным каплеобразованием металла по всему сечению электрода (рис. 6).

В результате проведенной работы показано, что получение титановых слитков способом ДШП может быть реализовано на существующих печах ЭШП с использованием обычных кристаллизато-

ров ЭШП, оборудованных флюсовыми затворами. Применение при ДШП титана флюсов с добавками (до 30 %) ФРЗМ позволяет обеспечить высокое качество поверхности слитков и плотную, без дефектов, макроструктуру.

1. А. с. 520784 СССР, МПК С 21 с 5/56. Способ переплава расходуемого электрода / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. И. Лакомский и др. — Оpubл. 07.07.82, Бюл. № 4.
2. О новых возможностях дугошлакового нагрева / Б. Е. Патон, Г. М. Григоренко, Б. И. Медовар и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1995. — № 4. — С. 3-6.
3. Медовар Б. И., Гуревич С. М. Бескислородные флюсы для сварки высоколегированных сталей и сплавов // Автомат. сварка. — 1955. — С. 31-41.
4. Дугошлаковый переплав — современное состояние и перспективы развития / Б. Е. Патон, В. Я. Саенко, Ю. М. Помарин и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2000. — № 4. — С. 18-20.
5. Перспективы применения металлического кальция и РЗМ при ЭШП / Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко, Ю. М. Помарин, В. И. Ус // Там же. — 2000. — № 4. — С. 18-29.
6. Троянский А. А., Рябцев А. Д. Электрошлаковый переплав металлов и сплавов под флюсами с активными добавками в печах камерного типа // Электрометаллургия. — 2005. — № 4. — С. 25-32.
7. Троянский А. А., Рябцев А. Д. О работах Донецкого национального технического университета по электрошлаковой выплавке и рафинированию титана // Литейн. произ-во. — 2007. — № 1. — С. 11-17.
8. Гуревич С. М., Дидковский В. П., Новиков Ю. К. Получение слитков и литых заготовок из титановых сплавов методом электрошлакового переплава // Электрометаллургия, 1964. — С. 184-188.

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

Поступила 10.02.2010



# ОСОБЕННОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОИЗВОДСТВА ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫХ ОТЛИВОК

С. В. Скрипник

Предложено новое конструктивное решение комплекса центробежного электрошлакового литья для непрерывного производства центробежных электрошлаковых отливок. Печь вместимостью 3 т снабжена механизмом поворота блока нерасходуемых электродов. В случае необходимости они занимают рабочую позицию для обогрева шлаковой и металлической ванн, а затем выводятся из плавильной зоны. Их место занимают расходные электроды. Металл со шлаком периодически заливают во вращающуюся форму центробежной машины новой конструкции.

New design solution of a complex of centrifugal electroslag casting for continuous production of centrifugal electroslag castings is offered. Furnace of 3 t capacity is equipped with a mechanism for rotation of unit of non-consumable electrodes. If necessary they occupy periodically the working position during heating of slag and metal pools, and then they are removed from a melting zone. Their place is occupied by consumable electrodes. Metal with a slag is poured periodically into a rotary mould of the centrifugal machine of a new design.

**Ключевые слова:** комплекс центробежного электрошлакового литья; тигельная печь; расходные и нерасходные электроды; центробежная машина; непрерывное литье

Способ центробежного электрошлакового литья (ЦЭШЛ) с вертикальной осью вращения, разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона, позволяет получать литые заготовки высокого качества, по своим свойствам не уступающие поковкам [1, 2]. Его преимущества, в сравнении с деформационными способами производства, заключаются в возможности получения крупногабаритных и фасонных заготовок из сталей и сплавов, в том числе из труднодеформируемых.

Благодаря сравнительной простоте этот способ находит все большее распространение в машиностроительном производстве. В то же время он существенно уступает по производительности деформационным способам, что обусловлено как специфическими особенностями, так и существующей практикой получения после одной плавки одной отливки, сдерживающей его применение в серийном производстве.

Для повышения производительности процесса и, следовательно, снижения стоимости изготовления заготовок требуется изменить характер производства в плане перехода к полунепрерывному или непрерывному литью. Такое производство может быть обеспечено комплексом ЦЭШЛ, снабженным электрошлаковой печью с нерасходуемыми и расходными электродами [3]. Смена расходных электродов в такой установке может производиться по ходу плавки.

Идея создания электрошлаковых печей со сменной расходных электродов по ходу плавки с предварительным подогревом погружаемых в шлаковую

ванну нижних концов сменных электродов воплощена в некоторых зарубежных и отечественных печах электрошлакового переплава (ЭШП) [4]. Однако эти печи являются неоправданно громоздкими и дорогостоящими. К тому же вопрос получения бездефектных слитков на печах ЭШП со сменой расходных электродов полностью не решен.

Многие исследователи выступают против даже кратковременных перерывов подачи энергии в шлаковую ванну, неизбежных при работе со сменой электродов по ходу плавки, считая даже кратковременное нарушение теплового баланса при ЭШП способствующим появлению микро- и макросегрегационных полос в слитке, пагубно отражающихся на усталостной прочности металла, имеющего эти дефекты [4].

Поскольку в процессах ЦЭШЛ применяют тигельную плавку, то температуру жидкого металла и состояние донной поверхности тигля легко регулировать параметрами ЭШП до и после смены электродов. Поэтому задача применения печи со сменой электродов для ЦЭШЛ существенно упрощается.

Предлагаемая установка со сменой расходных электродов по ходу плавки электродов (рис. 1) состоит из неподвижной колонны с основанием, верхней каретки с механизмом зажима расходных электродов и нижней каретки с поворотным механизмом, на котором установлены нерасходуемые электроды, а также токнесущие шины и соединители гибких водоохлаждаемых кабелей с муфтами поворота. Токнесущие шины и кабели верхней и нижней кареток подключены к одному и тому же источнику тока. Использование нижней каретки с поворотным механизмом, на котором установлены нерасходуемые

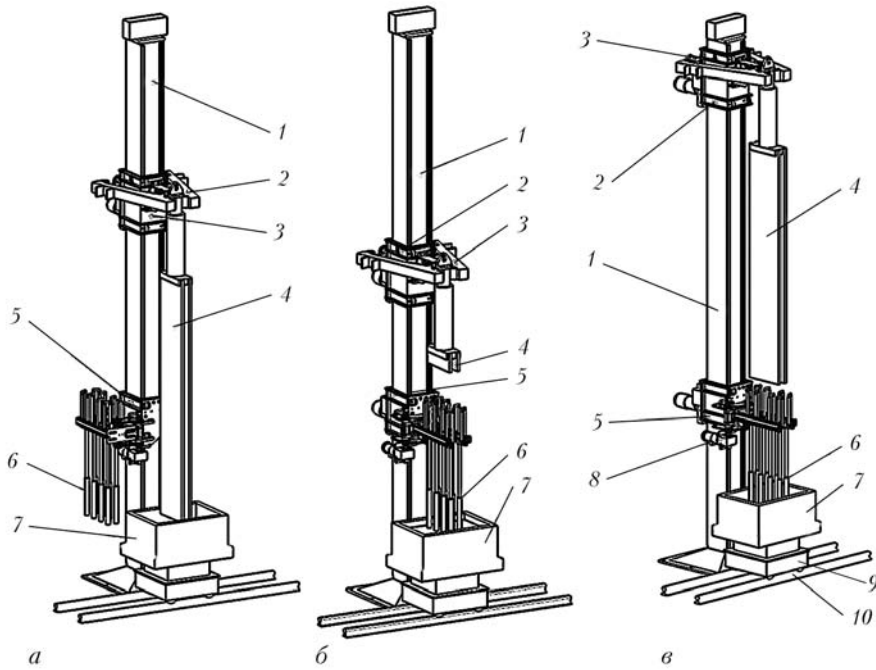


Рис. 1. Схема положения расходуемых и нерасходуемых электродов в процессе получения заготовок: *a* – переплав расходуемых электродов; *b* – обогрев шлака при смене электродов; *v* – установка новых электродов в процессе обогрева шлака; 1 – колонна с основанием; 2 – зажимное устройство расходуемых электродов; 3 – верхняя каретка; 4 – электроды; 5 – нижняя каретка; 6 – блок нерасходуемых электродов; 7 – тигель; 8 – поворотный механизм; 9 – рельсовый путь; 10 – выкатная тележка с электромеханическим приводом

электроды с функцией поворота их в нерабочую позицию и назад по ходу плавки, расширяет технологические параметры оборудования.

Еще одной отличительной особенностью такой установки является возможность настроечного регулирования на нижней каретке расстояния между нерасходуемыми электродами в двух координатах в горизонтальной плоскости, а также подбор их количества и размеров. Изменение диспозиции нерасходуемых электродов в шлаковой ванне позволяет использовать сменные керамические тигли различных размеров.

На рис. 2 представлена конструкция центробежной машины с вертикальной осью вращения, которой может быть снабжен комплекс ЦЭШЛ. Она имеет следующие характеристики:

наружный диаметр изложницы, мм.....	1800
высота изложницы, мм.....	1200
суммарная нагрузка на планшайбу, кг....	до 12000
номинальная частота вращения, 1/мин..	1500
частота вращения изложницы, 1/мин....	80... 800
мощность электродвигателя, кВт.....	110
масса отливки, кг.....	до 3000
масса центробежной машины, кг.....	4950

Центробежная машина представляет собой сваренную из швеллеров раму, которая крепится к фундаменту с помощью анкерных болтов. Привод состоит из асинхронного двигателя и микропроцессорного преобразователя частоты типа L300P фирмы «НИТАСНІ». Двигатель передает крутящий момент на приводной каток, с которым соединен муфтой. На раме под углом 120° крепятся три подшипниковых узла. В подшипниковых узлах смонтированы один ведущий и два ведомых катка без возможности радиального перемещения. Планшайба

диаметром 2000 мм приводится во вращение с помощью ведущего катка фрикционной парой. Все катки закрыты защитными щитками. Центральный подшипниковый узел фиксирует планшайбу в осевом положении.

Такая конструкция значительно разгружает вал и подшипники центрального подшипникового узла от нагрузок, вызванных существующим дисбалансом при вращении. Центр тяжести изложницы и отливки, т. е. точка приложения возмущающих центробежных сил, находится между ведущим и ведомыми опорными катками. Еще одной особенностью является возможность центрального вала отклоняться во время работы от вертикальной оси на некоторый угол, компенсирующий неточность прилегания планшайбы к каткам в горизонтальной плоскости.

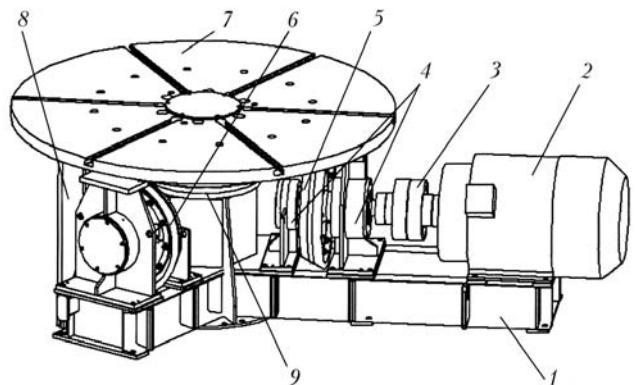


Рис. 2. Конструкция центробежной машины: 1 – станина; 2 – электродвигатель; 3 – муфта соединительная; 4 – узел подшипниковый; 5 – каток ведущий; 6 – каток ведомый; 7 – планшайба; 8 – щиток защитный; 9 – узел подшипниковый центральный

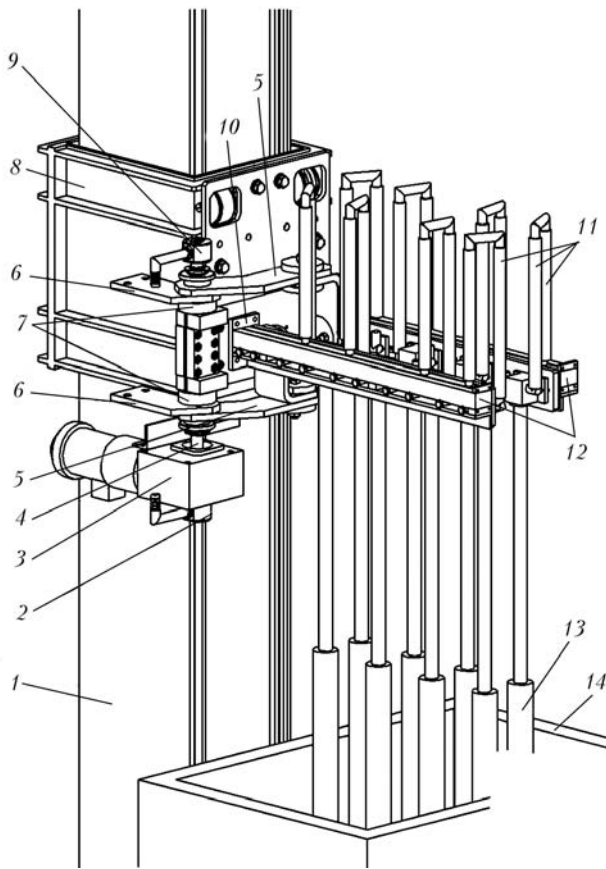


Рис. 3. Конструкция поворотного механизма: 1 – колонна; 2 – муфта; 3 – электромеханический привод; 4 – вал механизма поворота; 5 – шины токоподводящие; 6 – соединители; 7 – шарниры шин; 8 – каретка нижняя; 9 – муфты; 10 – фланцы подвода воды; 11 – элементы системы охлаждения; 12 – кронштейны передвижные; 13 – нерасходуемые электроды; 14 – тигель

В целях безопасности центробежная машина устанавливается на некотором удалении от тигельной печи в приямок, и ее рабочее пространство ограничено откатным защитным кожухом. Машина снабжена системами водовоздушного охлаждения и прокачки подшипников жидкой смазкой.

Представленный комплекс ЦЭШЛ работает следующим образом. В керамическом тигле наводят шлаковую ванну способом сухого старта или заливают порцию шлака, приготовленного в отдельной флюсоплавильной печи. Затем производят ЭШП расходующих электродов. Нерасходуемые электроды в это время занимают нерабочую позицию (рис. 1, а). После накопления в тигле необходимой порции жидкого металла расходующие электроды выводят из зоны плавки. Жидкий металл вместе со шлаком транспортируют с помощью выкатной тележки к центробежной машине, находящейся на расстоянии 5 м от печи, и заливают во вращающуюся форму центробежной машины. При этом небольшую порцию жидкого металла (10... 15 %) оставляют в тигле. Заливают новую порцию шлака, с помощью поворотного механизма, снабженного электромеханическим приводом, поворачивают в рабочую позицию блок нерасходуемых электродов (рис. 1, б). Подогревают шлаковую ванну нерасходуемыми электродами.

Параллельно с подогревом шлака выполняют замену расходующих электродов (рис. 1, в). Далее нерасходуемые электроды выводят из зоны плавки и вводят расходующие. Вывод из зоны плавки производят при помощи поворотного механизма (рис. 3).

Особенностью поворотного механизма является оригинальная конструкция токонесущих шин в виде шарниров. Это позволяет обеспечить минимальную паузу в процессе смены типа электродов. Перерыв в электрошлаковом процессе с учетом времени транспортировки тигля к центробежной машине и обратно занимает 2... 3 мин.

Одновременно с процессом переплава новых расходующих электродов происходит затвердевание и извлечение первой отливки из формы. После накопления нужной порции жидкого металла технологические операции повторяют.

Сравнительно небольшие заготовки деталей экономически нецелесообразно изготавливать способом ЦЭШЛ, уступающим по производительности деформационным. Поэтому комплексы ЦЭШЛ, по нашему мнению, следует оснащать центробежными машинами сравнительно большой мощности.

Это позволит изготавливать крупногабаритные бесшовные заготовки, например в кольце- и колесопркатном производстве, которые в настоящее время выполняют деформационно-сварными способами. При этом сварной шов при знакопеременных нагрузках является слабым звеном всей конструкции.

В случае применения комплекса ЦЭШЛ, снабженного тигельной печью и центробежной машиной сравнительно большой мощности, повышения производительности можно достичь как за счет увеличения массы отливки, так и путем применения многоступенчатых форм.

С переходом к непрерывному производству отливок предложенный комплекс ЦЭШЛ позволит повысить производительность процесса, а также экономичность и КПД процесса благодаря улучшению теплового баланса процесса плавки в постоянно разогретом тигле, повышению срока службы футеровки, работающей без термических циклов нагрева и охлаждения, сокращению подготовительных работ, осуществляемых ранее перед каждой плавкой (очистка донной поверхности тигля от остатков затвердевшего шлака, ремонт подового электрода при монофилярной схеме, проверка элементов системы водяного охлаждения и др.).

1. *Получение крупногабаритных конусных отливок из жаропрочной стали центробежным электрошлаковым литьем* / А. В. Горячек, В. В. Романов, С. В. Скрипник и др. // *Металлургия машиностроения*. – 2008. – № 1. – С. 26–28.
2. *Скрипник С. В., Чернега Д. Ф., Горячек А. В.* Исследование качества конусных заготовок из стали 20Х13, полученных способом центробежного электрошлакового литья // *Современ. электрометаллургия*. – 2008. – № 3. – С. 15–17.
3. *Пат. № 74472* Украина, МПК С 22 В 9/18, 9/187, В 22 D 23/10, С 21 С 5/56. Пристрій для електрошлакового переплаву металів та сплавів / О. В. Горячек, О. І. Українець, Є. Є. Трухін та ін. – Опубл. 15.12.2005, Бюл. № 12.
4. *Электрошлаковые печи* / Под ред. Б. Е. Патона и Б. И. Медовара. – Киев: Наук. думка, 1976. – 414 с.

НПФ «Титан», Киев  
Поступила 03.11.2009



УДК 669.187.826

## ПРОИЗВОДСТВО ТИТАНОВЫХ СЛИТКОВ И СЛЯБОВ СПОСОБОМ ЭЛП НА УСТАНОВКАХ, РАЗРАБОТАННЫХ В МК «АНТАРЕС»

А. Я. Дереча, О. Е. Собко-Нестерук, С. А. Сухин

Обобщен 10-летний опыт международной компании «АНТАРЕС» по созданию и развитию промышленного металлургического производства титана. Рассмотрены некоторые технические и технологические аспекты организации производства слитков (прямоугольной формы) и слябов на основе технологии электронно-лучевой плавки. Приведены физические параметры изготавливаемых слитков и слябов, их качественные характеристики.

The 10-year experience of the International Company «Antares» on the establishment and development of metallurgical production of titanium is generalized. Some technical and technological aspects of organizing the production of ingots and slabs (ingots of a rectangular shape) on the basis of technology of electron beam melting are considered. Physical parameters of produced ingots and slabs, their quality characteristics are given.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая плавка; установка; титан; слитки; слябы

Возрастающие требования к качеству титана со стороны потребителей аэрокосмического комплекса, а также стремление к удешевлению титановой продукции коммерческого назначения стимулируют развитие новых процессов производства слитков титана. Среди них важное место занимает электронно-лучевая плавка (ЭЛП) как один из наиболее эффективных способов переработки титанового скра-

па [1]. В некоторых случаях холодноподовая ЭЛП титана в сочетании с вакуумно-дуговым переплавом (ВДП) является неотъемлемым технологическим процессом получения титана роторного качества [2].

Сегодня в применении холодноподовой технологии ЭЛП заинтересованы ведущие производители титана США, Китая, Японии и Западной Европы. Построены мощные электронно-лучевые печи, способные плавить самые крупные титановые слитки и слябы, перерабатывать титановую губку и скрап [3].

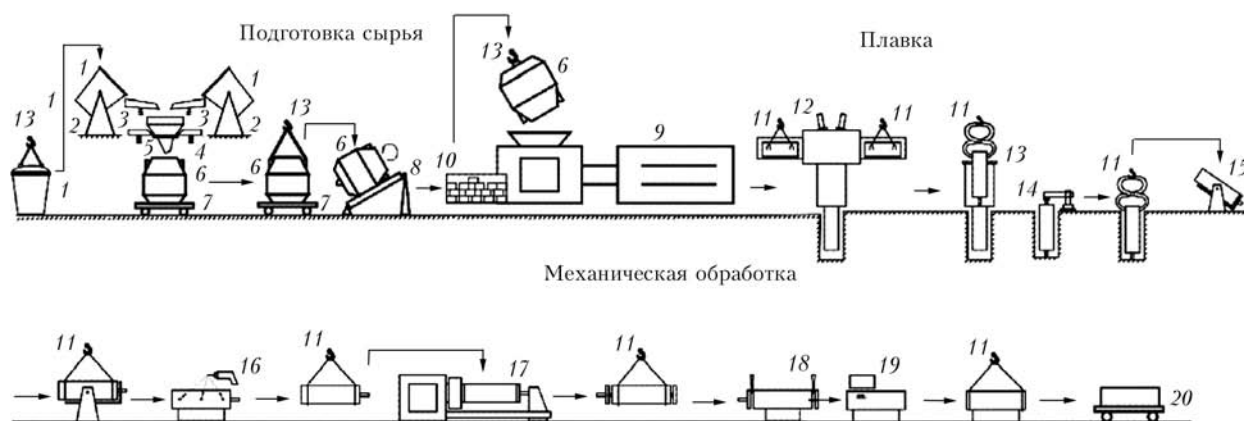


Рис. 1. Схема технологических потоков получения слитков титана: 1 – контейнер с губкой; 2 – кантователь; 3 – вибропитатель; 4 – весы-дозатор; 5 – бункер-дозатор; 6 – барабан смесителя; 7 – тележка; 8 – смеситель; 9 – пресс брикетировочный; 10 – контейнер с брикетами; 11 – кран мостовой; 12 – печь; 13 – гузозахватное устройство; 14 – радиально-сверлильный станок; 15 – кантователь; 16 – отбор проб; 17 – токарный станок; 18 – ленточнопильный станок; 19 – прибор УЗК; 20 – тележка передаточная

© А. Я. ДЕРЕЧА, О. Е. СОБКО-НЕСТЕРУК, С. А. СУХИН, 2010

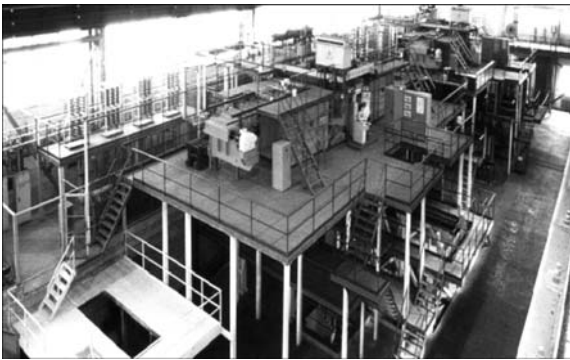


Рис. 2. Производственный цех ЭЛП МК «АНТАРЕС»

В 1999 г. благодаря объединению финансово-инвестиционных ресурсов в международной компании «АНТАРЕС» и практического опыта коллектива специалистов, длительное время работавших в области электронно-лучевых технологий, принято решение об организации промышленного производства титана на основе ЭЛП. Разработан и реализован проект металлургического производства с годовой программой выпуска 5000 т слитков титана. Главная цель проекта заключалась в создании экономичного производства титана высокого качества и превращении его в наиболее привлекательного в ценовом выражении производителя слитков и слябов.

Практическую реализацию проекта выполняли в несколько этапов в течение 2,5 лет. Закладка фундаментов для монтажа установок состоялась в 2000 г. Первую очередь пускового комплекса производства ввели в конце 2002 г. в следующем составе:

- линия для подготовки шихтовых материалов;
- две единицы установок ЭЛП;
- оборудование для механической резки и обработки слитков;
- заводская лаборатория для исследований и контроля качества металла.

Разработанные технология и комплект оборудования, применяемые в производстве слитков (рис. 1), позволяют использовать для переплава различное титановое сырье (скрап или титан губчатый отдельно и их смесь в любых пропорциях), а при необходимости вводить легирующие добавки.

Процесс подготовки шихты включает очистку, сортировку, дозировку и шихтовку титанового сырья, подлежащего переплаву. Линия подготовки



Рис. 3. Электронно-лучевая установка ВТ01

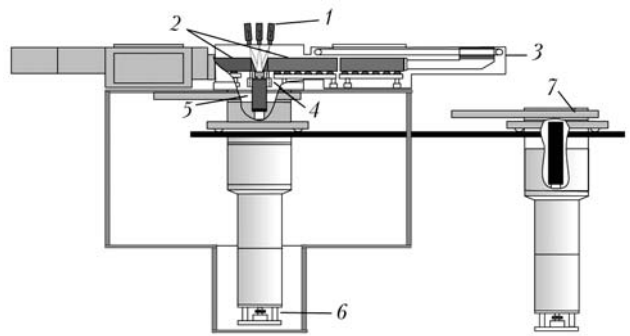


Рис. 4. Схема установки ВТ01: 1 — пушка ВТР; 2 — переплавляемая заготовка; 3 — механизм подачи заготовки; 4 — водоохлаждаемый кристаллизатор; 5 — слиток; 6 — механизм вытягивания; 7 — вакуумный затвор

шихты содержит устройства автоматической дозировки в составе двух ленточных питателей и электронных весов с выходом на интерфейс компьютера, что позволяет получать шихтовую смесь из нескольких компонентов в необходимых пропорциях. Для усреднения шихтовой смеси изготовлен конический барабанный смеситель вместимостью 0,65 м<sup>3</sup>.

Готовую смесь из сыпучих компонентов шихты подвергают уплотнению в брикеты на гидропрессе усилием 6,3 МН. Каждый из двух брикетировочных прессов может обеспечить изготовление 8 т брикетов из губчатого титана или 4 т брикетов из стружки в смену.

Перед загрузкой в установку переплавляемые шихтовые материалы помещают в обычные стальные контейнеры. Необходимое количество сырья для получения крупнотоннажных слитков обеспечивается кассетной загрузкой от двух до шести контейнеров. Вместимость контейнеров и их количество позволяют загрузить на плавку примерно 12 т брикетированной губки, стружки или плавильного лома.

Основу производства (рис. 2) составляют две промышленные электронно-лучевые установки ВТ01. Специализированные установки нового поколения (рис. 3), предназначенные для плавки титана, спроектированы, изготовлены и введены в эксплуатацию на протяжении короткого периода времени. Все оборудование для комплектации установок изготовлено в МК «АНТАРЕС» и на украинских заводах по кооперации.

**Техническая характеристика электронно-лучевой установки ВТ01**

Мощность ЭЛН, кВт.....	2800
Ускоряющее напряжение, кВ.....	30
Количество электронных пушек, шт.....	7
Рабочий вакуум, Па.....	0,133...1,330
Производительность вакуумной системы, л/с.....	70000
Наибольшие размеры заготовки, м:	
длина.....	4,0
диаметр.....	0,82
ширина/толщина.....	0,86/0,60
Количество загрузочных устройств, шт.....	2
Количество контейнеров на загрузку, шт.....	4...6
Размер слитков, м:	
диаметр.....	0,82; 0,64; 0,40; 0,38
длина.....	4,0
ширина/толщина.....	1,31/0,19; 1,31/0,26; 1,31/0,42
Габариты установки, м.....	20X20X16



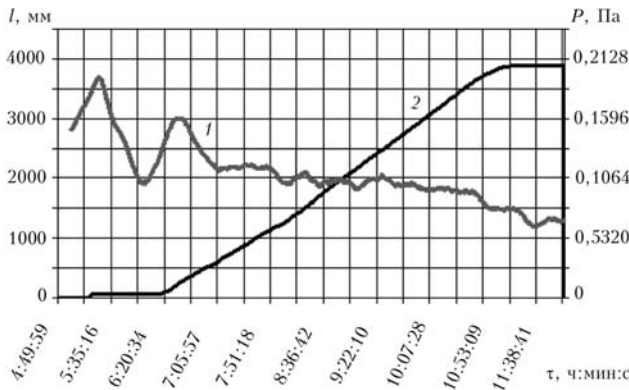


Рис. 5. Изменение вакуума (1) и длины  $l$  слитка (2) в процессе плавки

Проектная мощность производства одной установки ВТ01 составляет 2500 т титановых слитков и слябов в год.

Конструктивно электронно-лучевая установка ВТ01 состоит из герметичной камеры диаметром 3 м, к которой пристыкованы в верхней части семипушечный электронно-лучевой нагреватель (ЭЛН) на тележке; в нижней — модуль технологической оснастки и камера слитка с механизмом вытягивания на подвижной платформе; с двух сторон горизонтально расположены две загрузочные камеры с механизмами подачи и сменными контейнерами для шихты.

Для удобства обслуживания камеры в промежутках между плавками, а также для выгрузки крупнотоннажных слитков ЭЛН и камера слитка разрезаются относительно плавильной камеры. Предусмотрена возможность быстрой замены технологического модуля, объединяющего в единый блок кристаллизатор и медный холодный под, при переходе на другой типоразмер слитков, а также установка двух кристаллизаторов для параллельной отливки двух слитков одновременно. Схема установки ВТ01 приведена на рис. 4.

Такая конструкция установки ВТ01 обеспечивает хорошую функциональность, надежность и экономичность работы, при этом до минимума сокращается время непроизводительных простоев.

В процессе ЭЛП шихты, содержащей губчатый титан, основные трудности возникают из-за разбрызгивания металла и интенсивного газовыделения, нарушающих устойчивую работу электронных пушек.

Хорошей стабильностью в таких условиях плавки отличаются электронно-лучевые пушки высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) [4]. Ряд мощ-

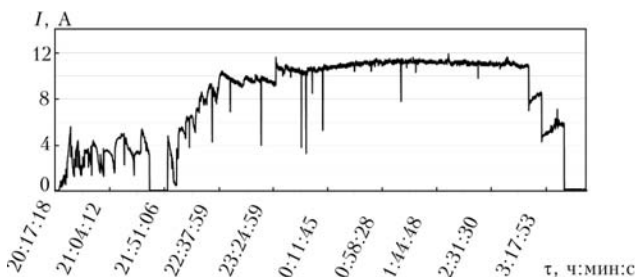


Рис. 6. Изменение тока электронного луча во время плавки

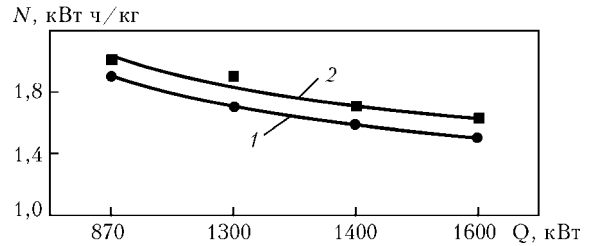


Рис. 7. Зависимость расхода  $N$  электроэнергии от подводимой мощности  $Q$ ; здесь и на рис. 8, 9: 1 — слиток диаметром 825 мм; 2 — прямоугольный слиток 190×1325 мм

ных пушек ВТР (единичной мощностью 400 и 600 кВт) созданы в МК «АНТАРЕС» при участии специалистов Киевского национального технического университета Украины. Особенность разработанных пушек ВТР состоит в том, что для их стабильной работы не требуется высокий вакуум. Уровень рабочего давления газов в таких пушках выше, чем остаточного в объеме плавильной камеры установки и находится в диапазоне 0,133... 6,660 Па.

Применение мощных электронных пушек ВТР в электронно-лучевых установках ВТ01 позволяет получать крупнотоннажные слитки титана при высоких скоростях плавления, сравнимых с ВДП в промышленных условиях. Благодаря этому существенно снижаются энергетические затраты, потери металла из-за испарения, упрощается задача получения слитков титана и его сплавов требуемого прецизионного состава.

Разработанные пушки ВТР отличаются простой конструкции и обслуживания, изготовлены из недефицитных материалов. Катод выполнен из алюминия, срок наработки которого превышает 1000 ч.

Для реализации принятой технологической схемы плавки установка ВТ01 содержит семь электронных пушек ВТР, размещенных на крышке камеры группами по функциональному принципу: по две на плавку каждой заготовки; одна — для поддержания слива на холодном поду; две — для нагрева металла в кристаллизаторе.

Каждая пушка имеет отдельный источник высоковольтного питания мощностью 630 кВт, собранный на тиристорных преобразователях. При такой схеме питания колебательные процессы при разрядах в отдельных пушках (в промежутке катод-анод) не влияют на стабильную работу других пушек.

Управление электронными лучами по нагреваемой поверхности выполнено от микропроцессора

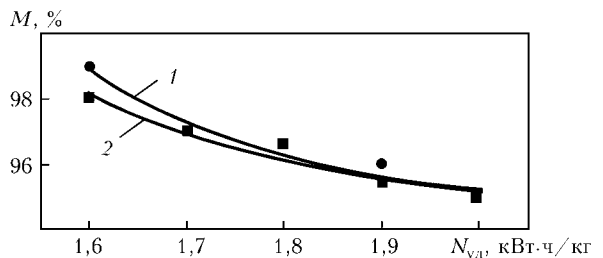


Рис. 8. Зависимость выхода годного металла  $M$  от удельного расхода  $N_{уд}$  электроэнергии

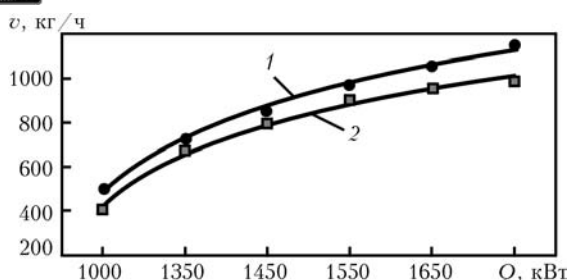


Рис. 9. Зависимость скорости  $v$  плавки от подводимой мощности

верхнего уровня и контроллеров с набором программ нижнего уровня. Программное распределение мощности и траектории электронных лучей создает требуемую оптимальную конфигурацию зон нагрева. Безопасный ход лучей ограничивается в пределах оснастки.

Установка ВТ01 оснащена системой контроля и записи параметров процесса плавки. Текущие параметры от массива датчиков регистрируются компьютером с определенной периодичностью и выводятся на печать в виде протокола плавки. На рис. 5, 6 представлены диаграммы записи изменения длины слитка, вакуума и электрических режимов пушек во время плавки.

Диаграмма вакуума показывает, что в начальный период происходит повышение давления в камере, обусловленное выделением адсорбированных газов с экранов и внутренних стенок камеры. При выходе на стационарный режим вакуум восстанавливается, стабилизируется работа электронных пушек (рис. 6), скорость плавки постоянная.

Другим важным фактором, обеспечивающим экономичный процесс получения слитков, является холодноподовый переплав на встречной подаче двух заготовок одновременно. Развитая поверхность плавления каждой заготовки создает условие для взаимного их «экранирования» и «аккумуляции» части лучистой энергии, а также продуктов разбрызгивания и испарения титана. При этом уменьшаются энергетические затраты на выплавку слитков и безвозвратные потери металла. Зависимость энергетических и массовых показателей про-

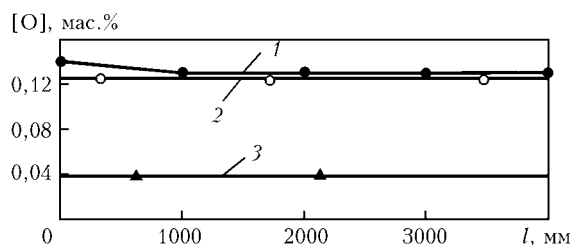


Рис. 10. Распределение кислорода в прямоугольном слитке 190×1325 мм, легированном  $TiO_2$ : 1 – экспериментальное; 2 – расчетное; 3 – в губчатом титане

цесса плавки губчатого титана при получении слитков диаметром 825 мм и прямоугольных 190×1325 мм приведена на рис. 7 и 8.

Так, при увеличении подводимой мощности электронного нагрева на плавку и росте скорости плавки происходит снижение расхода электроэнергии на единицу продукции, а выход годного при этом возрастает (рис. 9).

Химический состав слитков титана, полученных из губки марок ТГ100–ТГ130, приведен в таблице. По содержанию контролируемых элементов титан соответствует маркам Grade1 и Grade2 ASTM B348.

Низкое содержание кислорода в слитках, полученных из губчатого титана, не всегда является оправданным с точки зрения потребителя, прежде всего из-за механической прочности. В то же время кислород при определенном содержании является эффективным упрочнителем титана. Для повышения прочностных свойств титана коммерческой чистоты разработана эффективная технология его легирования. Добавки непиговой двуокиси титана  $TiO_2$  вводят на этапе подготовки брикетов из губки.

Результаты анализа кислорода в прямоугольном слитке, легированном кислородом, приведены на рис. 10. Содержание кислорода соответствует расчетному 0,13 мас. % при исходном содержании в губке 0,038...0,042 мас. %. Распределение кислорода по длине слитка практически равномерное. Выполнен ряд заказов по изготовлению титановых слитков массой 9 т с содержанием кислорода 0,22...0,24 %.

Химический состав слитков, полученных из губчатого титана, мас. %

Размер слитка, мм	Место отбора пробы	Fe	O	N	H	C	Остаток (max)	
							Каждого	Всего
Ø830	Голова	0,05	0,04	0,011	0,0017	0,01	≤0,1	≤0,4
	Дно	0,05	0,05	0,012	0,0018	0,01	≤0,1	≤0,4
Ø640	Голова	0,05	0,05	0,011	0,0019	0,01	≤0,1	≤0,4
	Дно	0,05	0,06	0,012	0,0019	0,01	≤0,1	≤0,4
190×1325	Голова	0,05	0,04	0,010	0,0015	0,01	≤0,1	≤0,4
	Дно	0,05	0,05	0,011	0,0018	0,01	≤0,1	≤0,4
ASTM B 348-00	Не более	0,30	0,25	0,030	0,0100	0,10	0,1	0,4

Примечание. Титан – основа.

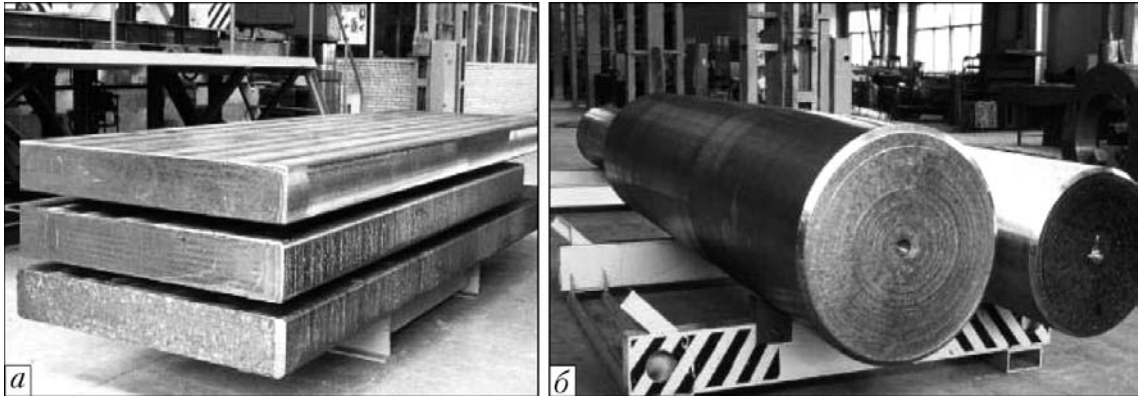


Рис. 11. Внешний вид слитков, произведенных на МК «АНТАРЕС»: а — прямоугольного сечения 190×1325 мм; б — круглого сечения диаметром 825 мм

В состоянии поставки слитки и слябы имеют обработанную поверхность. Цилиндрические слитки обтачивают на токарном станке 1А660, а прямоугольные — фрезеруют на станке 6М616.

Механическую обработку поверхности производят твердосплавными инструментами без применения охлаждающей жидкости, что не приводит к загрязнению образующейся стружки. Мелкие дефекты удаляют абразивной зачисткой. По согласованию с заказчиком, торцы слитков обрезают.

С целью снижения производственных затрат и расхода металла для порезки применяют ленточно-пильный станок производства фирмы «Everising» (Тайвань), позволяющий производить высокопроизводительную резку слитков. Ширина реза 1,6 мм. Максимальные возможности станка относительно разрезаемой заготовки — 1300×1300 мм.

Образующиеся после механической обработки титановые отходы в виде стружки и обрезей повторно вовлекаются в переработку при выплавке слитков. Перед использованием стружку измельчают и брикетируют.

Обработанные слитки и слябы подвергают 100%-му ультразвуковому контролю на наличие внутренних дефектов.

Качество титановых слитков контролируют в заводской лаборатории путем проведения анализа химического состава металла на соответствие требованиям заказчика и норм стандартов. Лаборатория оснащена приборами для спектрального анализа

«Spectromax» фирмы «Spectra» (Германия) и аппаратурой для анализа содержания газов (кислорода, азота, водорода) и углерода фирмы «Leco» (США).

С начала эксплуатации на установках переплавлено несколько тысяч тонн титанового сырья. При этом профиль и сортамент полученных слитков следующий: цилиндрические диаметром 825 и 640 мм, прямоугольные 190×1325; 250×1325; 420×1325 мм. Внешний вид слитков приведен на рис. 11.

В планах развития МК «АНТАРЕС» выполняется проект по изготовлению новой, более производительной установки для получения титановых слитков и слябов массой до 14 т.

1. *Состояние* технологии производства слитков титановых сплавов за рубежом // М. Н. Мусатов, А. Ш. Фридман, В. А. Фролов и др. // Технология легких сплавов. — 1990. — № 8. — С. 60–75.
2. Froes F. H., Senkov O. N. Titanium today and tomorrow // Electron-beam melting and refining state of the art, 1977. — P. 2–27.
3. Maximelt II — titanium hearth technologies for new electron-beam furnace // M. Ritchie, A. Mitchell, C. K. Rhee, S. L. Cockerft // Melting and Refining State of the art, 1997. — P. 252–261.
4. *Электронно-лучевая* плавка титановой губки с применением пушек высоковольтного тлеющего разряда // А. Л. Тихоновский, Н. К. Лашук, А. А. Тур и др. // Пробл. специальной электротехнологии. — 1993. — № 1. — С. 70–73.

МК «АНТАРЕС», Киев

Поступила 16.02.2010



УДК 621.793.12

## ЭРОЗИОННОСТОЙКИЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ КАРБИДА И НИТРИДА ТИТАНА С ПЛАСТИЧНЫМИ ПРОСЛОЙКАМИ\*

Е. В. Дабижа, А. А. Лещук, И. В. Бондарь, Н. Н. Борисова

Обоснованы перспективы использования ионно-плазменных способов для нанесения износо- и эрозионностойких многослойных защитных покрытий. Показано, что способы микроэлектродугового плазменного вакуумного и магнетронного вакуумного напылений, которые относятся к данной группе, являются наиболее многофункциональными. Приведены результаты модернизации вакуумной установки ВУ-700«Д»(М), в которой смонтированы три периферийных источника микроэлектродугового и один источник магнетронного распыления. Разработаны новые технологические и аппаратные решения, позволяющие наносить защитные эрозионностойкие многослойные покрытия общей толщиной до 30 мкм на компрессорные лопатки газотурбинных двигателей. Исследовано влияние толщины мягкой кобальтовой прослойки и температуры процесса осаждения на критическую толщину многослойных покрытий из карбида и нитрида титана, а также нанотвердость данных покрытий.

Prospects of application of ion-plasma methods for deposition of wear- and erosion-resistant multi-layer protective coatings are grounded. It is shown that the methods of micro electric arc plasma vacuum and magnetron vacuum coating depositions, which refer to the given group, are most multi-functional. Results of updating the vacuum installation VU-700«D»(M), in which three periphery sources of micro electric arc deposition and one source of magnetron sputtering are mounted, are given. New technological and hardware solutions have been developed, allowing deposition of protective erosion-resistant multi-layer coatings of total thickness of up to 30 m on compressor blades of gas turbine engines. The effect of thickness of a soft cobalt interlayer and temperature of deposition process on critical thickness of multi-layer coatings of carbide and titanium nitride, as well as on nanohardness of the mentioned coatings was investigated.

**Ключевые слова:** защитное износостойкое покрытие; плазменно-дуговой способ нанесения покрытий; магнетронное распыление; карбид и нитрид титана; лопатка; газотурбинный двигатель; износостойкость; эрозионная стойкость; пластичная прослойка; кобальт

Применение покрытий является одним из прогрессивных способов модификации поверхности деталей и улучшения их поверхностных свойств в машино- и приборостроении, повышения эксплуатационных характеристик инструмента, важным звеном во многих технологических циклах создания новых материалов. В связи с этим развитию способов и технологий нанесения покрытий и их всестороннему изучению уделяется особое внимание.

В настоящее время разработано большое количество способов нанесения покрытий, реализованных в ряде вакуумных установок, которые предназначены для осаждения покрытий из различных материалов на разнообразные изделия.

Среди всех современных способов получения покрытий наиболее многофункциональными и перспективными признаны способы нанесения пок-

крытий в низкотемпературной газоразрядной плазме, создающие, помимо пара металла, ионизированные частицы, которыми можно управлять с помощью электрического и магнитного полей. По сравнению с более энергоемкими способами термического и электронно-лучевого испарения, указанные позволяют более эффективно (т. е. с меньшими затратами энергии и реагентов) выполнять диспергирование материалов в атомарное, молекулярное, кластерное состояние и осуществлять их осаждение на поверхность изделий в виде тонких (до 10 мкм) функциональных, вспомогательных или декоративных покрытий [1].

При ионно-плазменном нанесении покрытий высокая адгезия их к основе обеспечивается физико-химическим взаимодействием потока плазмы с поверхностью подложки, которая находится под заданным потенциалом, в связи с чем наряду с конденсацией происходит ионная бомбардировка поверхности детали и ее активирование, а в результате этого — интенсивное внедрение в поверхностный слой подложки атомов требуемого материала.

\* Статья подготовлена по результатам выполнения комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций сооружений и машин» (2007–2009 гг.).



К ионно-плазменным способам нанесения покрытия относятся магнетронное распыление, микроэлектродуговое испарение (распыление) и активированное реактивное испарение [2–4]. Наиболее перспективны в этой группе первые два способа. Последний является модификацией термического испарения, что расширяет его возможности, но полностью не устраняет имеющиеся недостатки.

Основные преимущества указанных способов нанесения покрытия обусловлены физическими принципами, лежащими в основе их реализации. Возможность распыления (испарения) материала из твердой фазы или зоны частичного расплавления позволяет отказаться от дорогостоящих испарительных элементов, изготовленных, как правило, из тугоплавких дефицитных материалов. Отсутствие испарительных элементов с ограниченным сроком службы и сравнительно небольшой загрузкой позволяет резко увеличить скорость роста покрытия и его толщину, а также общую поверхность покрываемых деталей. Возможность наращивания толстых слоев покрытия является определяющим условием для использования указанного способа при нанесении толстых эрозионностойких покрытий на различные изделия.

Распыление ионами материала катода или его взрывное микроиспарение открывают путь к созданию покрытий в виде сплава с сохранением стехиометрического состава исходного материала, а введение химически активного газа — к получению химических соединений. Благодаря наличию ионной составляющей в распыляемом материале появляется возможность ее ускорения при подаче на подложку с отрицательным потенциалом. В связи с этим на подложке происходят процессы активации поверхностных атомов, способствующие увеличению адгезии покрытия к подложке, распыления атомов с ее поверхности (ионное травление) и имплантации ионов.

Габариты систем ионно-плазменного распыления можно изменять в широких пределах, что позволяет наносить покрытия на изделия различных размеров, при этом достигается высокая воспроизводимость результатов и относительная простота управления процессом распыления.

Как известно, способ микроэлектродугового испарения с ионной бомбардировкой основан на инициировании микроэлектродугового разряда в вакууме на поверхности катода и образовании таким образом катодных пятен, имеющих исключительно высокие значения плотности и температуры [5–7].

Выделение большой мощности обусловлено бомбардировкой зоны катодного пятна ионами распыляемого материала. Благодаря высокой температуре и ионной бомбардировке в состав продуктов эрозии катода в зоне пятна входят капли расплавленного металла, атомы и ионы. Размер капель и их количество определяются теплофизическими свойствами материала катода и током дугевого разряда [5].

Как показано в работе [8], расход массы катода в ионной фазе на единицу переносимого заряда для данного материала является величиной постоянной, в то время как эрозия катода в капельной фазе (в каплях) зависит от технологических условий и увеличивается с ростом заряда, переносимого через единицу площади (ток микроэлектродугового разряда).

Испускаемые катодом капли в процессе их переноса от катода к подложке дополнительно нагреваются за счет бомбардировки их поверхности ионами и, испаряясь, служат основным источником нейтрального пара в объеме разрядного промежутка. При этом, если распыляется сплав, в состав которого входят металлы, имеющие существенное отличие от упругости пара, то испарение более летучего компонента происходит с большой скоростью, что приводит к изменению состава как капли, так и осаждаемого покрытия, по сравнению с составом материала катода [5].

В процессе бомбардировки испаряющегося пара ионами происходит также дополнительная ионизация его атомов, в результате чего доля ионов составляет 30...50 % общего потока, конденсируемого на поверхности изделия [8].

При подаче реакционного газа (азота, метана или кислорода) в разрядный промежуток происходит его взаимодействие с продуктами распыления металла катода и осаждение покрытия в виде соединений (нитридов, карбидов или оксидов переходных металлов), которые имеют высокую твердость, прочность и могут служить в качестве защитных износостойких покрытий на различных изделиях.

Реализация процессов микроэлектродугового реактивного распыления достигается простыми способами при использовании в качестве источника питания стандартных сварочных выпрямителей, что является значительным преимуществом данного способа, по сравнению с другими [4]. Однако этот способ имеет и существенные недостатки, например наличие капельной фазы в покрытии.

Способ магнетронного распыления не имеет указанного недостатка, поскольку осаждение у него происходит в виде атомов распыляемого материала (частично в виде его ионов). Магнетронная распылительная система — это модификация широко известных систем диодного распыления. Кроме положительных свойств диодного распыления, магнетронное имеет свои преимущества: высокую скорость конденсации материалов; уменьшение загрязнений конденсатов газовойми включениями; снижение температуры разогрева подложки в процессе осаждения покрытия.

Физической основой магнетронной распылительной системы является самостоятельный аномальный тлеющий разряд в разреженном газовом пространстве в скрещенных электрическом и магнитном полях. Магнитная система создает над поверхностью катода магнитное поле арочной конфигурации напряженностью 0,03...0,13 Тл [3].

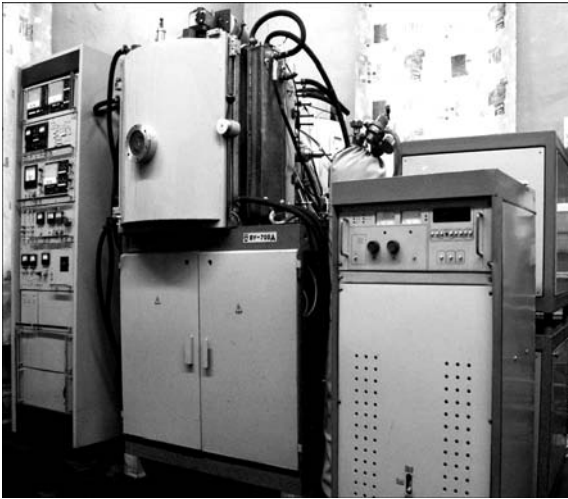


Рис. 1. Общий вид модернизированной вакуумной установки ВУ-700«Д»(М)

Имеющиеся в этой зоне электроны совершают сложное циклоидальное движение и при столкновении с молекулами газа ионизируют их, создавая положительные ионы, которые ускоряясь в электрическом поле, бомбардируют поверхность мишени-катода и выбивают из нее частицы материала.

При бомбардировке поверхности катода ионами распыляющего газа проявляются два основных эффекта – вторичная электронная эмиссия и ионное распыление мишени катода. Вторичная эмиссия электронов служит для поддержания разряда, а распыленные атомы конденсируются на подложке в виде покрытия.

Наличие концентрированной зоны плазмы в прикатодном пространстве позволяет получить более высокие, чем при диодном распылении, плотность ионного тока и скорость распыления, что связано с изменением механизма распыления от прямого соударения при бомбардировке ионами для диодного распыления до механизма распыления пиков для магнетронного распыления [9]. Для последнего, в отличие от механизма распыления прямым соударением, характерна линейная зависимость скорости осаждения от мощности магнетронного разряда, что позволяет легко автоматизировать

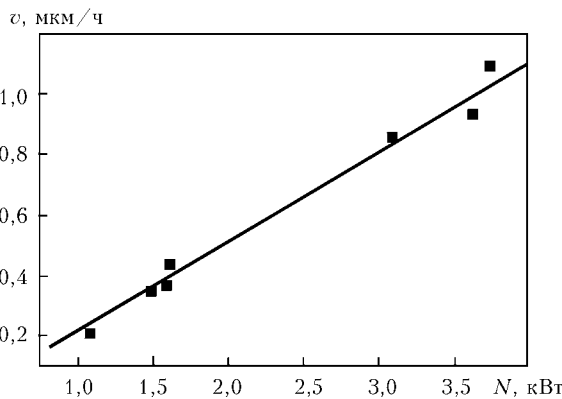


Рис. 2. Зависимость скорости  $v$  осаждения титана от мощности  $N$ , прикладываемой к магнетрону с косвенным охлаждением мишени-катода

Таблица 1. Состав износостойких покрытий и их свойства

Состав покрытий	Микротвердость, ГПа	Стойкость к окислению при наибольшей температуре на поверхности, °С	Коэффициент трения
TiN	19,3...22,0	600	0,50
TiC	28,0...30,0	400	Нет данных
TiCN	30,0	400	0,40
TiAlN	30,0...35,0	540	0,40
TiAlCrN	35,0	920	0,40
TiAlCrYN	27,0	950	Нет данных
CrN	16,5...21,5	700	0,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,0...30,0	1200	Нет данных
ZrN	28,0	600	0,60
MoS <sub>2</sub>	15,0	–	0,02
WC/C	15,0	300	0,20

подачу реакционного газа при осаждении покрытий в виде химических соединений распыляемого металла и реакционного газа.

В качестве рабочего газа в магнетронных распылительных системах обычно используют аргон в режиме постоянного тока. Эти системы работают при давлении аргона от 0,01 до 100 Па и напряжении разряда 300...800 В [3].

Магнетронные распылительные системы позволяют получать покрытия практически из любых металлов, сплавов и полупроводниковых материалов без нарушения стехиометрического состава, что делает их весьма перспективными для применения в ряде областей науки и техники.

Наличие у этого способа ловушки для электронов, образующейся в скрещенных магнитных и электрических полях, обеспечивает высокую степень ионизации атомов газа. В связи с этим введение в разрядный газовый объем дополнительно реакционных газов (азота, метана, кислорода) в результате высокой степени их ионизации и активации позволяет получать пленки соединений переходных металлов (нитридов, карбидов и оксидов).

Наиболее распространенные составы защитных износо- и эрозионностойких покрытий и их свойства приведены в табл. 1 [10].

Для реализации вакуумных технологий нанесения покрытий использована модернизированная вакуумная установка Сморгонского завода оптического станкостроения ВУ-700«Д»(М), Беларусь, общий вид которой представлен на рис. 1.

Базовая установка представляет собой цилиндрическую вакуумную камеру диаметром и высотой по 700 мм, на левой стенке которой в кармане смонтирован магнетрон с косвенным охлаждением мишени, а на правой находится электрод для очистки поверхности напыляемых изделий в косвенном тле-

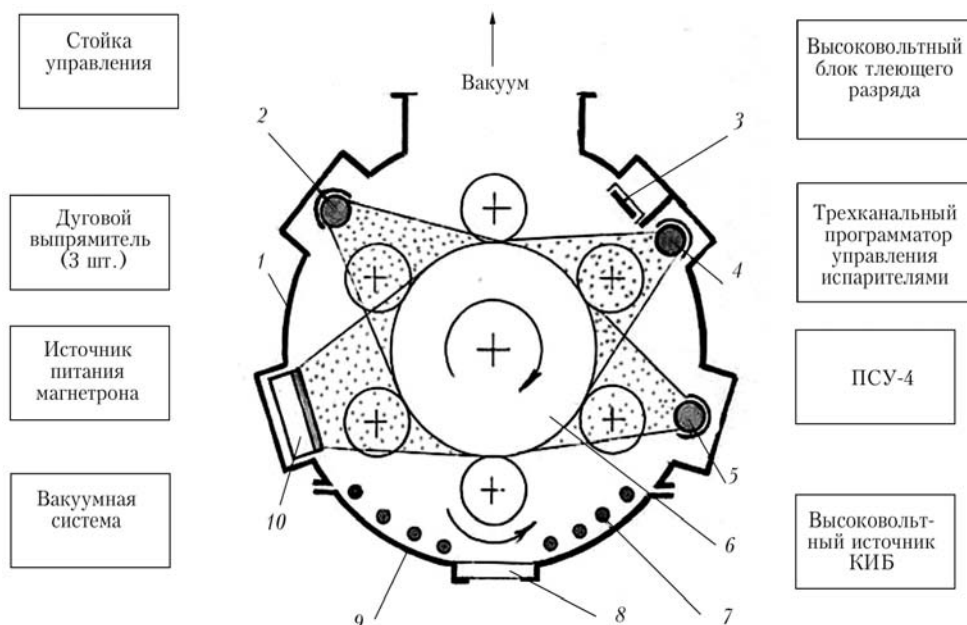


Рис. 3. Блок-схема модернизированной установки ВУ-700«Д»(М): 1 – вакуумная камера; 2, 5 – дуговые испарители (с титановым катодом); 3 – электрод косвенного тлеющего разряда; 4 – дуговой испаритель (с кобальтовым катодом); 6 – удерживающая оснастка двойного планетарного вращения; 7 – электронагреватель; 8 – смотровая система; 9 – дверь; 10 – магнетрон

ющем разряде. На верху камеры расположен вакуумный ввод вращения, на котором смонтирована шестипозиционная удерживающая оснастка двойного планетарного вращения изделий длиной до 500 мм и диаметром до 140 мм для экспонирования их поверхностей в паровом потоке.

Характеристики данной распылительной системы исследовали при реализации процесса распыления мишени из титана (рабочее давление аргона составляло 0,08 Па). Зависимость скорости осаждения титанового покрытия от подводимой к магнетрону мощности показана на рис. 2.

Как видно из рисунка, скорость осаждения покрытия представляет собой линейную зависимость от прикладываемой мощности. При мощности  $N = 3,5$  кВт косвенное охлаждение мишени уже не справляется с ее охлаждением, а при выключении питания магнетрона в камере видно слабое малиновое свечение мишени катода.

Исследование скорости осаждения при большей мощности проводили при циклическом включении магнетрона (по 5 мин работы и остывания мишени магнетрона). Как показали результаты исследования, увеличение мощности, подводимой к магнетрону, более 3,5 кВт способствует еще большему разогреву мишени и некоторому ее короблению, что приводит к ухудшению охлаждения и увеличению разогрева мишени.

При разогреве мишени до температуры более 700 °С происходит снижение эффективности распыления атомов титанового катода атомами аргона. Поскольку скорость осаждения покрытия 0,9 мкм/ч не решает задачи по наращиванию толстых многослойных эрозийноустойчивых покрытий, потребовалась разработка магнетрона с прямым водяным охлаждением мишени-катода и модернизация вакуумной ка-

меры установки для введения дополнительных испарительных и распылительных систем.

На рис. 3 представлена блок-схема модернизированной установки ВУ-700«Д»(М). Как видно из рисунка, модернизированная установка оснащена нагревательными элементами, которые смонтированы на двери. Нагреватели закрытого исполнения предназначены для прогрева камеры и изделий в вакууме перед нанесением покрытий и поддержания температуры в процессе осаждения покрытий.

Общая мощность нагревателей составляет 5 кВт. На левой стороне цилиндрической стенки вакуумной камеры имеется «карман», в котором смонтирован линейный модернизированный магнетрон с прямым охлаждением мишени-катода.

Схема сборки катодного узла модернизированного магнетрона с прямым охлаждением мишени-катода представлен на рис. 4.

Общий вид модернизированного магнетрона представлен на рис. 5. Размер его мишени-катода составляет 145×520 мм. Из рисунка видно, что

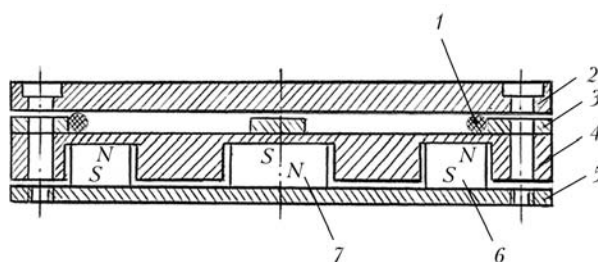


Рис. 4. Схема сборки катодного узла модернизированного магнетрона с прямым охлаждением мишени-катода: 1 – резиновый валик вакуумного уплотнения; 2 – мишень-катод; 3 – медная пластина водяного охлаждения; 4 – медный сепаратор для магнитов; 5 – нижний «башмак» магнитной системы; 6, 7 – соответственно периферийные и центральные магниты магнетрона



Рис. 5. Общий вид модернизированного магнетрона с прямым охлаждением мишени-катода

длина зоны распыления немного меньше длины мишени-катода (460 мм).

Зависимость скорости осаждения титанового покрытия от прикладываемой к магнетрону мощности для модернизированного магнетрона показана на рис. 6. Скорость осаждения покрытия имеет линейную зависимость и при мощности более 5 кВт, что свидетельствует о достаточно эффективном охлаждении мишени. Данная конструкция магнетрона позволяет ему работать при мощности до 10 кВт.

Как видно из рис. 3, в модернизированном варианте установки вакуумная камера имеет три дополнительных водоохлаждаемых кармана, в которых установлены два специально разработанных линейных периферийных дуготрона с титановым катодом и один периферийный с кобальтовым катодом, а также катодный узел для предварительной очистки изделий в тлеющем разряде. Общий вид дуготронов с титановым и кобальтовым катодами представлен соответственно на рис. 7 и 8.

Как показали исследования, упомянутые дуготроны и разработанные для них блоки управления и питания эффективно работают при токе микроэлектродугового разряда 120...200 А. Необходимое

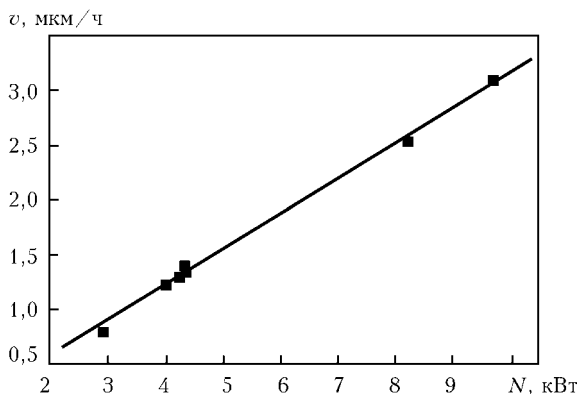


Рис. 6. Зависимость скорости  $v$  осаждения титана от мощности  $N$ , прикладываемой к магнетрону с прямым охлаждением мишени-катода

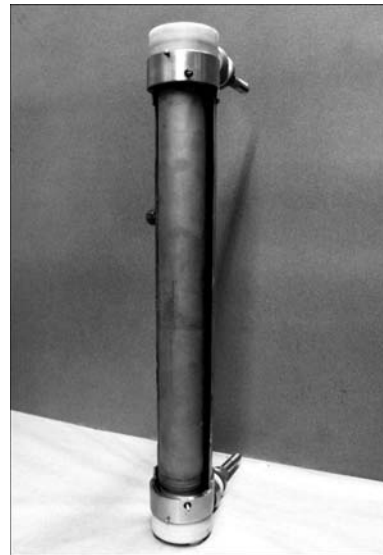


Рис. 7. Общий вид линейного периферийного дуготрона с титановым катодом

охлаждение стенок карманов дуготронов обеспечивается в процессе их работы при токе разряда 200 А. Скорость осаждения покрытия из нитрида титана при токе микроэлектродугового разряда 165 А и работе одного дуготрона составляет 3,1, двух — 6 мкм/ч.

Модернизированная установка укомплектована блоком питания магнетрона большей мощности БПМ-25 с общей мощностью 25 кВт. Для процесса катодной ионной обработки изделий смонтирован дополнительный блок питания общей мощностью 25 кВт, предназначенный для разогрева изделий до 500 °С. Для автоматического смешивания газов (распылителя аргона и реакционного газа) в заданной пропорции при магнетронном реакционном осаждении покрытий установка дополнительно оснащена системой спектрального анализа и автоматического управления напуском газов ПСУ-4.



Рис. 8. Общий вид блока катодного узла тлеющего разряда и дуготрона с кобальтовым катодом





Используя способы микроэлектродугового или магнетронного распыления можно получать различные защитные эрозионностойкие покрытия (табл. 1). Экспериментально доказано, что существует некоторая критическая толщина таких покрытий (5...7 мкм), при достижении которой происходит их разупрочнение и частичное или полное самопроизвольное разрушение после охлаждения до комнатной температуры, что вызвано высоким уровнем внутренних напряжений, возникающих вследствие различия коэффициента термического расширения материалов покрытия и подложки [11].

Получение толстых покрытий из карбида или нитрида титана способом микроэлектродугового вакуумного ионно-плазменного испарения затруднено, поскольку происходит их отслоение от подложки. Указанный способ нанесения покрытий обеспечивает эффективную очистку поверхности детали ионами высокой энергии, а также параллельно ее разогрев и активацию, что способствует высокой прочности адгезии покрытия к подложке.

Для уточнения природы отслоения покрытий от подложки на поверхность образца из стали X18H9T размером 20×10×1,5 мм наносили суспензию из графита, смешанную с ацетоном. После высыхания на образце оставался тонкий слой дисперсного графита, который при осаждении на него покрытия должен обеспечивать низкую прочность адгезии покрытия к поверхности образца. На подготовленный таким образом образец наносили покрытие из TiN толщиной 5 мкм. Температура нагрева образца в процессе осаждения покрытия составляла (500±20) °С; после остывания в вакуумной камере при вакууме 0,008 Па образец выгружали. Покрытие отслаивалось от его поверхности путем вздутия сплошной пленки, которая при этом не разрушалась.

Проведенные ранее исследования по нанесению такого покрытия на чистые пластинки из стали X18H9T показали, что покрытие также отслаивалось, но в процессе отслоения от поверхности образца происходило одновременное его разрушение на мельчайшие частички.

Это свидетельствует о том, что полученное покрытие имеет высокую прочность сцепления с поверхностью образца. Нескомпенсированное усилие, необходимое для отрыва и разрушения покрытия на маленькие фрагменты, придает им энергию, с которой они отлетают от поверхности образца.

Усилие отрыва создает напряжения, которые накапливаются в слое покрытия при его прочном сцеплении с поверхностью.

Как было описано выше, при отсутствии адгезии обнаружено только отслоение покрытия без его разрушения. Разрушение покрытия свидетельствует как об уровне напряжений, накопленных в покрытии, так и о прочности адгезии покрытия к подложке. Поэтому удобной комплексной технологической характеристикой, оценивающей проч-

ность сцепления покрытия с подложкой, можно считать критическую толщину слоя покрытия, при которой усилие, дополнительно прикладываемое к поверхности покрытия для его отрыва от подложки, уменьшается настолько, что покрытие самостоятельно отслаивается от подложки. Отслоение, как правило, происходит после остывания образца с покрытием, а иногда и в процессе осаждения, если толщина сформировавшегося покрытия значительно превышает критическое значение.

Нанесение покрытий на тонкие пластинки из нержавеющей стали X18H9T размером 40×10×0,4 мм приводит к их изгибанию, что указывает на наличие значительных напряжений в формируемом слое покрытия.

Как показали исследования, уровень внутренних напряжений в формируемом слое увеличивается с ростом его толщины. Установлено, что напряжения выше у покрытий из нитрида титана, чем из карбида титана, а соответственно, значение критической толщины у нитрида титана ниже. Для наращивания более толстого слоя покрытия используем эффект уменьшения напряжений за счет чередования слоев, у которых толщина значительно меньше критической для данного материала и условий, с тонкими прослойками из пластичного материала [12]. Все это учитывали при формировании многослойных покрытий из этих материалов с мягкой прослойкой.

В модернизированной установке ВУ-700«Д»(М) разработаны новые технологические и аппаратурные решения, позволяющие наносить защитные эрозионностойкие многослойные покрытия. С учетом критической толщины покрытия из карбида или нитрида титана расчетная толщина слоев в многослойном покрытии из карбида титана составляла 3,4, а из нитрида титана — 2,9 мкм.

Как показали проведенные нами исследования, в качестве мягкой прослойки могут служить тонкие слои из стали X18H9T или кобальта, хотя последний является более эффективным материалом прослойки.

Проведены исследования влияния толщины прослойки кобальта на критическую толщину многослойного покрытия Co/TiC. В качестве образцов использовали пластинки размером 20×10×1,5 мм из стали X18H9T.

В вакуумной камере пластинки подвергали очистке способом конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ) при 600 и 1200 В и нагревали при ионной бомбардировке до (400±20) °С. Давление реакционного газа метана CH<sub>4</sub> в процессе осаждения покрытия из TiC составляло (0,18±0,05) Па.

После нанесения каждого слоя покрытия из TiC образец остывал в вакуумной камере при вакууме 0,008 Па до температуры 100 °С, после чего его выгружали и он остывал до комнатной температуры на воздухе.

Если многослойное покрытие после нанесения очередного слоя не отслаивалось, то образец загру-

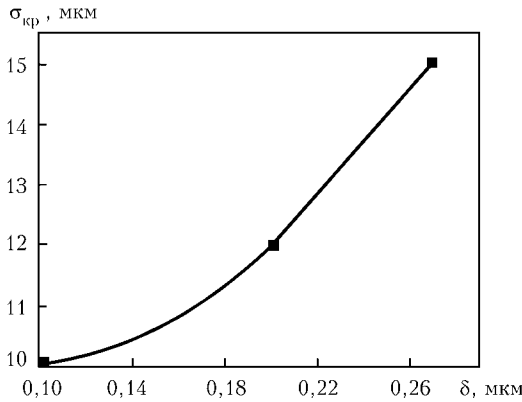


Рис. 9. Зависимость критической толщины  $\delta_{кр}$  многослойного покрытия  $Co/TiC$ , сформированного при температуре подложки  $400\text{ }^{\circ}C$ , от толщины  $\delta$  кобальтовых прослоек

жали снова в вакуумную камеру для доращивания очередного слоя. При достижении критической толщины многослойного покрытия обнаружены случаи отслоения и разрушения покрытия от части или всей напыляемой площади. Толщина многослойного покрытия, при которой это происходило, считалась критической.

Зависимость критической толщины многослойного покрытия  $Co/TiC$ , сформированного при температуре  $(400\pm 20)\text{ }^{\circ}C$ , от толщины кобальтовых прослоек показана на рис. 9. Как видно из рисунка, с увеличением толщины кобальтовой прослойки критическая толщина увеличивается не линейно, а по нарастающей. При толщине мягкой прослойки  $0,27\text{ }\mu m$  критическая толщина многослойного покрытия  $Co/TiN$  составляет  $15\text{ }\mu m$ .

Поскольку при данной толщине пластичной прослойки на зависимости, показанной на рис. 9, насыщение не зафиксировано, то в дальнейшем будет представлять интерес исследовать влияние значительно большей толщины прослойки из кобальта на критическую толщину многослойного покрытия.

Проведенные нами исследования показали, что температура, при которой происходит формирование покрытия, является очень важным параметром процесса. Поскольку у покрытия из  $TiN$  напряжения в растущем слое нарастают интенсивнее, чем у покрытия из  $TiC$ , важно исследовать влияние температуры на формирование многослойного покрытия на

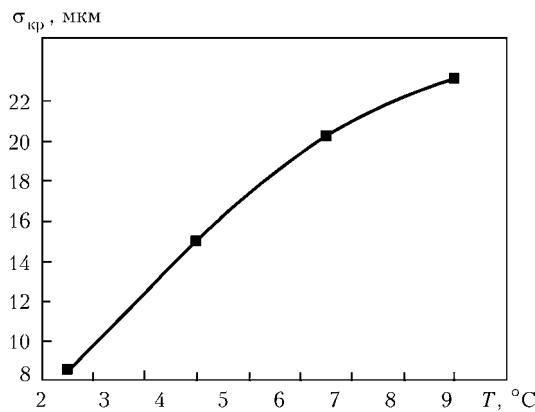


Рис. 10. Зависимость критической толщины  $\delta_{кр}$  многослойного покрытия из  $Co/TiN$  от температуры подложки, при которой происходит осаждение

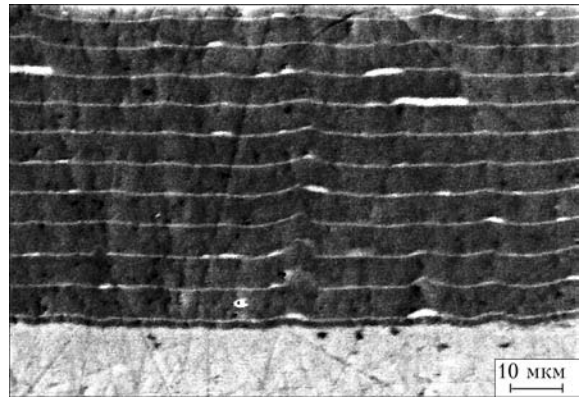


Рис. 11. Типичная микроструктура многослойного покрытия на основе  $TiCN$  с пластичными прослойками кобальта (суммарная толщина покрытия  $30\text{ }\mu m$ )

основе  $TiN$ . Для этого на образцы из стали X18H9T размером  $20\times 10\times 1,5\text{ }\mu m$  послойно, как и в предыдущих опытах, наносили многослойное покрытие  $Co/TiN$  при разной температуре процесса. Толщина слоев из  $TiN$  составляла  $2,9\text{ }\mu m$ , а прослойки из  $Co$  —  $0,27\text{ }\mu m$ .

Температура формирования покрытия  $300\text{...}500\text{ }^{\circ}C$  является очень важной, поскольку именно в данном диапазоне температуры формируются структуры столбчатых или нитевидных кристаллов, которые являются характерными для процессов наращивания покрытий [13, 14]. При более высокой температуре вследствие объемной диффузии атомов образуется структура равноосных зерен, характерная для монолитного материала.

Зависимость критической толщины многослойного покрытия из  $Co/TiN$  от температуры подложки, при которой происходит осаждение, показана на рис. 10. Из рисунка видно, что эта зависимость носит нелинейный характер. Наиболее существенное влияние оказывает этот параметр при температуре, близкой к  $400\text{ }^{\circ}C$ . При температуре подложки  $450\text{ }^{\circ}C$  и выше влияние этого параметра ослабляется. В то же время данная кривая не имеет явно выраженного насыщения при температуре, близкой к  $500\text{ }^{\circ}C$ .

Таблица 2. Физические свойства покрытий из нитрида титана

Покрытие $Co/TiC$ (толщина, мкм)	Модуль упругости, ГПа	Среднее значение модуля упругости, ГПа	Нанотвердость, ГПа	Среднее значение нанотвердости, ГПа
Однослойное (3,4)	384,8	384,8	32,7	32,7
Двухслойное (6,8)	381,2	415,2	33,4	36,3
	421,5		37,1	
Четырехслойное (13,7)	442,8	408,3	38,5	35,8
	408,3		35,8	
Шестислойное (13,7)	364,8	354,2	31,9	30,8
	343,6		29,7	



Исследованы физико-механические свойства многослойных покрытий из Co/TiC. С этой целью, как и в предыдущих исследованиях, использовали пластинки из нержавеющей стали X18H9T размером 20×10×1,5 мм, с нанесенным многослойным покрытием на основе TiC с прослойками из кобальта.

Многослойное покрытие из Co/TiC получили послойным допылением очередного слоя после вскрытия камеры и выгрузки образца с данным количеством слоев для последующих исследований.

Остальные образцы подвергали следующему циклу напыления: очередной слой покрытия из TiC наносили после разогрева образца способом КИБ до  $(400 \pm 20)$  °С и нанесения на него мягкой прослойки из кобальта. Толщина последней составляла 0,3 мкм, а основного твердого эрозионностойкого слоя из TiC — 3,4 мкм.

На образцах, изготовленных таким образом с разным количеством слоев многослойного покрытия Co/TiC, проводили исследования их нанотвердости. Перед этим верхний слой покрытия из TiC полировали для уменьшения его шероховатости до значений, приемлемых для испытаний на наноинденторе.

Исследования нанотвердости выполняли на установке «Nano Indenter-II, MTS Systems Corporation», Oak Ridge, TN, USA, испытания твердости — на трехгранном инденторе Берковича. После испытаний твердость определяли по глубине отпечатка под нагрузкой, а модуль упругости — по кривой разгрузки.

Результаты исследований нанотвердости и модуля упругости для многослойных покрытий Co/TiC, осажденных при температуре  $(400 \pm 20)$  °С, приведены в табл. 2.

Типичная многослойная микроструктура показана на рис. 11.

Интересным является факт, что при многослойном нанесении покрытия на основе TiC нанотвердость покрытия в отдельных случаях достигала 38,5 ГПа, что значительно превышает микротвердость аналогичных, но однослойных покрытий. Нагрузка и глубина индентирования покрытия при данных испытаниях соизмеримы с условиями воздействия на него при эрозионном износе, поэтому высокие физико-механические характеристики многослойного покрытия подтверждают эффективность его нанесения на изделия в качестве защитного эрозионностойкого покрытия.

Таким образом, данная модернизированная установка имеет новые технологические и аппаратурные возможности нанесения защитных эрозионностойких покрытий в многослойном варианте общей толщиной 30 мкм и более, в том числе для защиты компрессорных лопаток газотурбинных двигателей от эрозионного износа, что повышает их эксплуатационные характеристики и значительно увеличивает срок службы.

1. Мовчан Б.А., Малащенко И.С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. — Киев: Наук. думка, 1983. — 232 с.
2. Бессо Ж.Ж. Методы вакуумного нанесения покрытий и их сравнительный анализ // Семинар фирмы «Сит Алкатель» (Москва, 1982 г.). — М., 1982. — С. 15–18.
3. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. — М.: Радио и связь, 1982. — 120 с.
4. Электродуговое распыление металлов и сплавов в вакууме: Обзор // Ю.Н. Андреев, Т.М. Андреева, А.И. Вовси и др. — Рига: ЛатНИИИТИ, 1982. — 45 с.
5. Раховский В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. — М.: Наука, 1970. — 636 с.
6. Любимов Т.А., Раховский В.И. Катодное пятно вакуумной дуги // Успехи физ. наук. — 1978. — 125, № 4. — С. 665–706.
7. Вакуумные дуги. Теория и приложение / Под ред. Дж. Лаферти. — М.: Мир, 1982. — 428 с.
8. Лунев В.М., Падалка В.Г., Хороших В.М. Исследование некоторых характеристик плазмы вакуумной металлической дуги // Журн. техн. физ. — 1977. — 47, вып. 7. — С. 1491–1495.
9. Бондарь И.В. Закономерности формирования металлизационных покрытий на алмазных порошках при вакуумном напылении: Дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1991. — 100 с.
10. Современные вакуумные технологии получения покрытий // Е. В. Дабига, Н. В. Новиков, Н. Н. Борисова и др. // Современ. электрометаллургия. — 2005. — № 4. — С. 34–40.
11. Properties of titanium based hard coatings deposited by the cathodic arc method / A. Popescu, I. Tudor, V. Braic et al. // J. of Optoelectronics and Advanced Materials. — 2002. — 4, N 1, March. — P. 115–120.
12. Пат. 6804 Украина, МПК С 23 С 14/32. Многослойное износостойкое покрытие, полученное ионноплазменным методом // О.Л. Головченко, В.Е. Дабига. — Оpubл. 16.05.2005, Бюл. № 5.
13. Мовчан Б.А., Демчишин А.В. Исследование структуры и свойств толстых вакуумных конденсатов никеля, титана, вольфрама, окиси алюминия и двуокиси циркония // Физ. металлов и металловед. — 1969. — 28, вып. 4. — С. 653–660.
14. John A.Th. Influence of substrate temperature and deposition rate on structure of thick sputtered Cu coatings // J. Vac. Sci. Techn. — 1986. — A4 (6), Nov./Dec. — P. 3059–3065.

Ин-т сверхтвердых материалов  
им. В. М. Бакуля НАН Украины

Поступила 13.01.2010



# О ВОЗМОЖНОСТЯХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН

А. И. Устинов, А. П. Зиньковский,  
И. Г. Токарь, В. С. Скородзиевский

Изложены результаты экспериментальных исследований по определению влияния характеристик структуры на физико-механические свойства материалов покрытий и демпфирующую способность конструктивных элементов с покрытиями при учете таких факторов, как температура, частота и амплитуда напряжения.

Results of experimental investigations for determination of effect of characteristics of structure on physical-mechanical properties of materials of coatings and damping capability of design elements with coatings with account for such factors as temperature, frequency and amplitude of stress are described.

**Ключевые слова:** покрытие, наноструктура материала; температура; конструктивный элемент; частота колебаний; логарифмический декремент колебаний; динамическая напряженность

**Введение и постановка задачи.** Развитие современного машиностроения предъявляет высокие требования к надежности и долговечности как отдельных конструктивных элементов, так и машин в целом. Поскольку большинство из них эксплуатируются в условиях широкого спектра динамических нагрузок, которые могут вызвать выход из строя и разрушение конструктивных элементов, а также привести к катастрофическим последствиям, то одной из ключевых задач достижения надежного функционирования в течение требуемого ресурса является обеспечение их динамической прочности.

Особенно актуальной эта задача является для авиационных газотурбинных двигателей (АГТД), большинство (более 60 %) дефектов которых, выявляемых при проектировании, доводке и эксплуатации, обусловлены недостаточной прочностью узлов и конструктивных элементов, в первую очередь рабочих лопаток. При этом около 70 % дефектов имеют вибрационное происхождение.

Одним из наиболее важных технико-экономических показателей качества изделий машиностроения является обеспечение их вибрационной надежности. Однако в большинстве случаев вследствие значительной плотности частот собственных и вынужденных колебаний при эксплуатации рассматриваемых объектов невозможно исключение опасных резонансных режимов. Поэтому используют различные конструктивно-технологические способы, снижающие опасность их последствий, среди которых определяющим является повышение

демпфирующей способности как средства ограничения максимальных резонансных напряжений наиболее напряженных конструктивных элементов.

Применительно к рабочим лопаткам компрессоров АГТД, изготавливаемым из высокопрочных с низкими значениями диссипативных свойств титановых сплавов, одним из эффективных способов повышения вибрационной надежности является нанесение на перо высокодемпфирующих покрытий [1]. Поскольку эти сплавы чувствительны к поверхностным повреждениям, покрытия должны также отличаться необходимым комплексом физико-механических характеристик — высокими показателями твердости, предела выносливости, коррозионной стойкости и прочее, т. е. они должны одновременно обеспечивать надежное сопротивление воздействию условий, в которых эксплуатируются конструктивные элементы.

В настоящее время накоплен значительный опыт в создании таких покрытий, которые в той или иной мере удовлетворяют условиям производства и эксплуатации АГТД [2]. Вместе с тем следует отметить, что параметры указанных характеристик материалов, которые можно было бы использовать в качестве высокодемпфирующих покрытий, недостаточны, а их повышение путем легирования или термомеханической обработки, как правило, приводит к ухудшению диссипативных свойств.

С учетом тенденций развития современного авиадвигателестроения, проявляющихся в повышении температуры газа и амплитуд динамических напряжений, расширении спектра частот внешних нагрузок, возникает потребность в создании новых материалов для покрытий. К последним можно отнести разрабатываемые в Институте электрос-

\* Статья подготовлена по результатам выполнения комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» (2007–2009 гг.).



варки им. Е.О. Патона НАН Украины наноструктурированные вакуумные конденсаты (в дальнейшем конденсаты) [3], осаждаемые на конструктивные элементы из паровой фазы по технологии, приведенной в работе [4].

Актуальной задачей с точки зрения возможности применения материалов таких покрытий в производстве рабочих лопаток компрессоров современных АГТД является определение оптимальных параметров структуры их материала и условий осаждения для обеспечения повышения демпфирующей способности лопаток при эксплуатации, что и является целью настоящей работы.

**Материалы покрытий и способ их получения.** В данной работе в качестве основного материала покрытия выбрали квазикристаллический сплав Al-Cu-Fe, характеризующийся повышенными значениями твердости (10...11 ГПа) и коррозионной стойкости [5, 6], а также медь чистую и с добавками железа (до 4 %). Последние два материала можно использовать как связующий подслои, отличающийся высоким уровнем адгезии с материалом конструктивного элемента и покрытия. Кроме того, наличие меди в составе покрытия обуславливает возрастание рассеяния энергии в колебательной системе, поскольку в наноструктурированном состоянии она отнесется к высокодемпфирующим материалам [7].

Покрытия толщиной 50...150 мкм из выбранных материалов получали по технологии электронно-лучевого испарения и осаждения в вакууме [4]. Осаждение осуществляли на стержневые образцы из титанового сплава ВТ1-0, характеризующегося низкими диссипативными свойствами при значениях температуры до 450 °С [8]. Заготовками для покрытий служили слитки меди и железа, а также таблетки спрессованной смеси порошков алюминия, меди, железа. При осаждении покрытий Cu-Fe испарение металлов осуществлялось из двух мишеней одновременно. Предварительно поверхность образца очищали в вакуумной печи ионным пучком аргона. Скорость осаждения покрытий составляла 2...3 мкм/мин, а их структурное состояние изменялось путем варьирования температуры образца в пределах 160...600 °С.

Осаждение покрытий на компрессорные лопатки АГТД с целью обеспечения их однородности по всей поверхности выполняли в режиме их вращения. Для этого лопатки крепили к горизонтальному валу, вращающемуся в процессе формирования покрытий.

Структуру покрытий исследовали методами сканирующей и электронной микроскопии (прибор CamScan4), а их микротвердость измеряли на поперечных шлифах образцов методом Виккерса с использованием оптического микроскопа Polyvar-Met при нагрузке 0,05 Н длительностью 10 с.

**Основные положения методик исследования диссипативных свойств материалов покрытий и демпфирующей способности конструктивных элементов.** Характеристики рассеяния энергии материала покрытий определяли расчетно-экспериментальным методом. Первоначально по результатам испытаний консолюно закрепленных образцов

с покрытием на установке, приведенной в работе [9], в режиме затухающих колебаний получали амплитудные зависимости логарифмического декремента колебаний. Затем на их основе по расчетной методике работы [10] определяли амплитудные зависимости истинного логарифмического декремента для материала покрытия, т.е. его характеристики рассеяния энергии при однородном напряженном состоянии.

Для определения демпфирующей способности конструктивных элементов использовали созданные в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины экспериментальные средства по изучению диссипативных свойств материалов и конструктивных элементов как при комнатной, так и повышенных значениях температуры [11], обеспечивающих минимизацию потерь энергии в сочленениях, не связанных с гистерезисными потерями в материалах объекта испытаний и покрытиях. Логарифмический декремент колебаний определяли методом резонансной кривой [1].

В качестве объекта испытаний выбрали консолюный образец прямоугольного поперечного сечения ( $h \times b \times l = 4 \times 12 \times 150$  мм). Покрытие наносили только на одну поверхность рабочей части образца по всей ее ширине  $b$  начиная от корневого сечения. Оно имело неизменную длину 50 мм. Испытывали образец при постоянной толщине  $h = 4$  мм и уменьшении длины  $l$  его рабочей части от 150 до 50 мм для достижения необходимой частоты колебаний.

В соответствии с постановкой задачи установлен следующий диапазон изменения параметров испытаний: частота колебаний 150...1000 Гц, температура 20...400 °С (в целом соответствует основным режимам эксплуатации рабочих лопаток компрессора АГТД).

**Структура и свойства материалов покрытий.** Структуру покрытий из меди изменяли путем варьирования температуры осаждения  $T_c$  в диапазоне 160...600 °С, вследствие чего размер  $D$  зерна (кристаллита) столбчатой формы уменьшался от 4...5 мкм ( $T_c = 600$  °С) до 0,3...0,4 мкм ( $T_c = 160$  °С). При этом обнаружено качественное изменение субструктуры кристаллитов.

Из рис. 1 видно, что с уменьшением температуры осаждения изменяется внутреннее строение кристаллитов, что проявляется в образовании прослойки из двойниковых доменов, расположенных преимущественно параллельно фронту роста кристаллитов (таблица). Количество таких двойников резко возрастает с понижением температуры осаждения начиная с  $T_c \approx 350$  °С [7]. При дальнейшем снижении температуры их количество увеличивается, что приводит к формированию в кристаллитах полидоменной нанодвойниковой субструктуры (рис. 1, а).

Переход к нанодвойниковому структурному состоянию покрытий из меди обуславливает резкое увеличение их микротвердости от 0,8 до 1,5 ГПа [7], а также качественное изменение характеристик рассеяния энергии, что проявляется в существенном ослаблении амплитудной зависимости логарифмического декремента, присущей крупнозернистой меди, с сохранением высоких значений при нагреве (рис. 2).

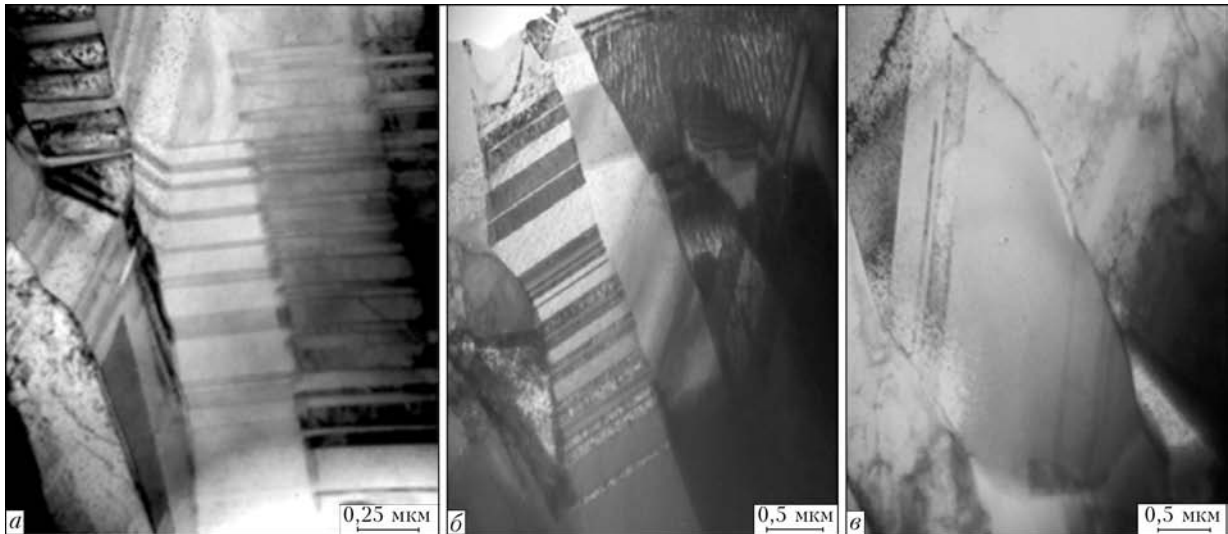


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения поперечного сечения конденсатов меди, осажденных на образец при значениях температуры 170 (а), 230 (б) и 350 (в) °С; а –  $\times 4000$ ; б, в –  $\times 2000$

Кроме того, в отличие от крупнозернистой меди, характеристики рассеяния энергии этих покрытий сохраняются после многократного циклического деформирования.

Дополнительного увеличения микротвердости покрытий (до 2 ГПа) достигают в результате добавления в медь 2...4 % железа. Характеристики рассеяния энергии такого покрытия Cu–Fe в этом случае снижаются при больших амплитудах деформации. Вместе с тем они остаются достаточно высокими и циклически стабильными при температуре испытаний 20...350 °С. При этом зафиксировано почти полное совпадение кривых, полученных в ходе циклического деформирования образцов при температуре 250 °С, с исходной кривой.

Изменение механических и диссипативных свойств покрытий из конденсатов меди и Cu–Fe при формировании в них нанодвойниковой субструктуры обусловлено существенным ослаблением роли внутризеренных дислокаций как в процессе пластической деформации, так и при рассеянии механической энергии.

При размерах структурных элементов примерно 100 нм генерация «свежих» дислокаций в металлах становится невозможной [12]. С другой стороны, с уменьшением размера зерен увеличивается роль зернограничной поверхности, в результате чего в наност-

руктурированных материалах доминирующими становятся механизмы рассеяния энергии, связанные с термически активированной перестройкой атомных конфигураций на границах зерен.

На рис. 3 приведены результаты исследования влияния размера зерна на характеристики рассеяния энергии для покрытий из композитного сплава Al–Cu–Fe. В покрытиях, осаждаемых при  $T_c = 650$  °С, средний размер зерен  $D$  составлял 580 нм. При снижении температуры осаждения до 350 и 270 °С он уменьшался соответственно до 270 и 30 нм. Для покрытий с размерами зерна 580 и 270 нм параметры характеристик рассеяния энергии в интервале значений температуры 20...400 °С оказались невысокими, однако с его уменьшением до 30 нм зафиксировано резкое возрастание декремента колебаний при температуре 250...400 °С (рис. 3).

Особенностью рассматриваемых наноструктурированных покрытий является амплитудно независимый характер вплоть до амплитуд относительной деформации  $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-3}$ , что важно с практической точки зрения. Следует также отметить высокую твердость таких покрытий (15 ГПа) и меньшее значение модуля упругости (177 МПа), по сравнению с покрытием такого же состава с размерами зерна, равными 270 и 580 нм, и модулем упругости соответственно 207 и 210 МПа.

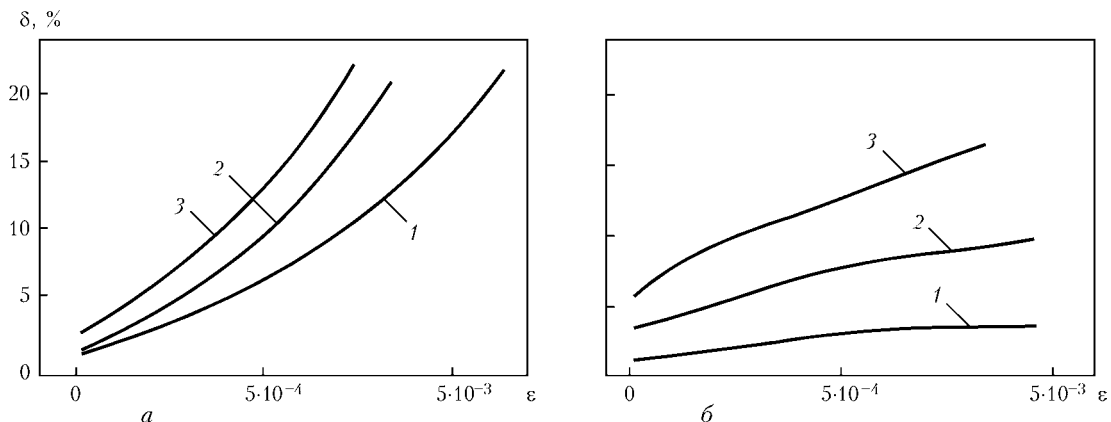


Рис. 2. Амплитудные зависимости логарифмического декремента колебаний для конденсата меди с размером зерна 2,5 мкм (а) и с полидоменной нанодвойниковой субструктурой (б) при значениях температуры 20 (1), 250 (2) и 350 (3) °С

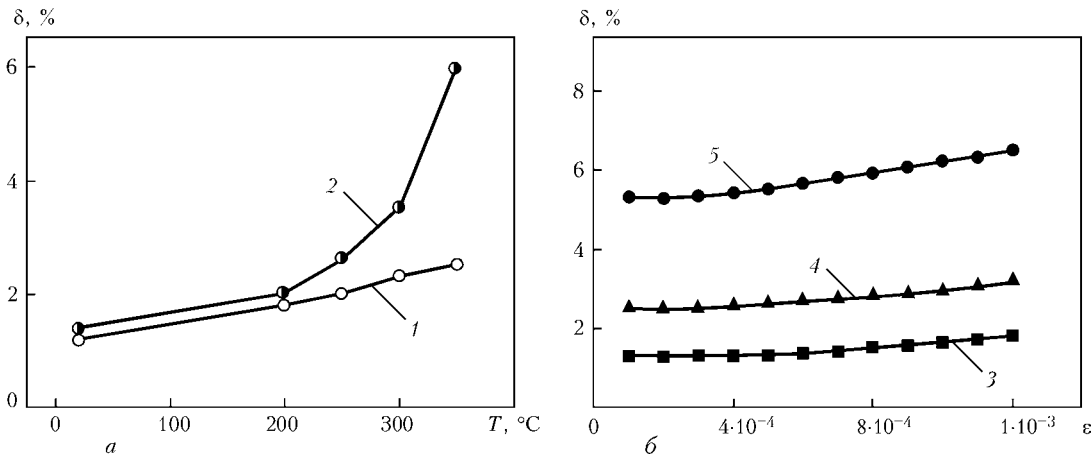


Рис. 3. Зависимости логарифмического декремента колебаний образца с покрытием из сплава Al-Cu-Fe от температуры (а) при амплитуде относительной деформации  $\epsilon = 5 \cdot 10^{-4}$  для размера зерна 580 (1) и 30 (2) нм и от амплитуды относительной деформации (б) при размере зерна 30 нм и варьировании температуры, °С: 3 – 20; 4 – 300; 5 – 350

Таким образом, из результатов проведенных исследований следует, что путем выбора соответствующих режимов электронно-лучевого осаждения на поверхности конструктивных элементов можно формировать наноструктурированные покрытия с повышенным уровнем диссипативных и механических свойств.

**Результаты определения демпфирующей способности конструктивных элементов с покрытиями и их анализ.** Для анализа выбрали три вида покрытий из указанных материалов, характеристики которых приведены в таблице.

По полученным амплитудно-частотным характеристикам образцов определяли значения их логарифмического декремента колебаний и соответствующие его зависимости от амплитуды максимальных напряжений  $\sigma_{max}$  при варьировании частоты колебаний и температуры испытаний для различных значений параметров покрытий. Следует отметить, что при резонансных испытаниях невозможно обеспечить одинаковую частоту колебаний образцов. Но поскольку это расхождение незначительно, то оно несущественно повлияло на анализ результатов испытаний.

Для выполнения сравнительного анализа влияния тех или иных факторов на демпфирующую способность образцов с выбранными покрытиями предварительно определили амплитудные зависимости декремента колебаний для образца без покрытия в заданном диапазоне частот колебаний при комнатной температуре (20 °С), приведенные на рис. 4, а. Из представленных результатов видно, что указанные зависимости носят линейный характер, а влияние частоты колебаний на значение декремента колебаний несущественно при малых амплитудах напряжений и несколько возрастает при их увеличении.

Рассмотрим результаты выполненных испытаний с точки зрения влияния частоты колебаний на демпфирующую способность образцов с выбранными покрытиями.

Анализ амплитудных зависимостей декремента колебаний образцов с однокомпонентными покрытиями (образцы 1–9, полученные при комнатной температуре), соответствующих их определенному

структурному состоянию (рис. 4, б, в), показал, что в данном случае влияние частоты колебаний на значение декремента зависит от типа покрытия. Так, наиболее существенная частотная зависимость декремента колебаний характерна для медного покрытия, особенно при повышенных амплитудах максимальных напряжений. Менее выражена она для образцов с покрытием из железа.

Наглядно влияние частоты на декремент колебаний образцов иллюстрируется частотными его зависимостями, которые для амплитуды максимальных напряжений ( $\sigma_{max} = 50$  МПа) приведены на рис. 5. Здесь по оси абсцисс отложена средняя частота колебаний с учетом невозможности обеспечения при испытаниях ее одинакового значения.

Из представленных результатов испытаний следует, что демпфирующая способность образцов существенно зависит от характеристик микроструктуры.

**Состав покрытий, характеристики их структуры и нанесения на образцы**

№ образца	Состав покрытия	Температура осаждения $T_c$ , °С	Размер зерна $D$ /толщина двойников $d$ , нм	Толщина покрытия $h_{пл}$ , мкм
1	Медь	605	3000	97
2	»	345–350	1400/160	150
3	»	240–245	780/65	170
4	»	600	2800	33
5	»	600	2800	100
6	»	300	1100/105	87
7	»	300	105	72
8	Железо	700	2500	110
9	»	340	70	102
10	Al-Cu-Fe	500	430	53
11	»	500	430	62
12	»	300	110	55
13	»	300	110	58

Примечание. Толщина двойников в конденсатах меди указана в знаменателе.

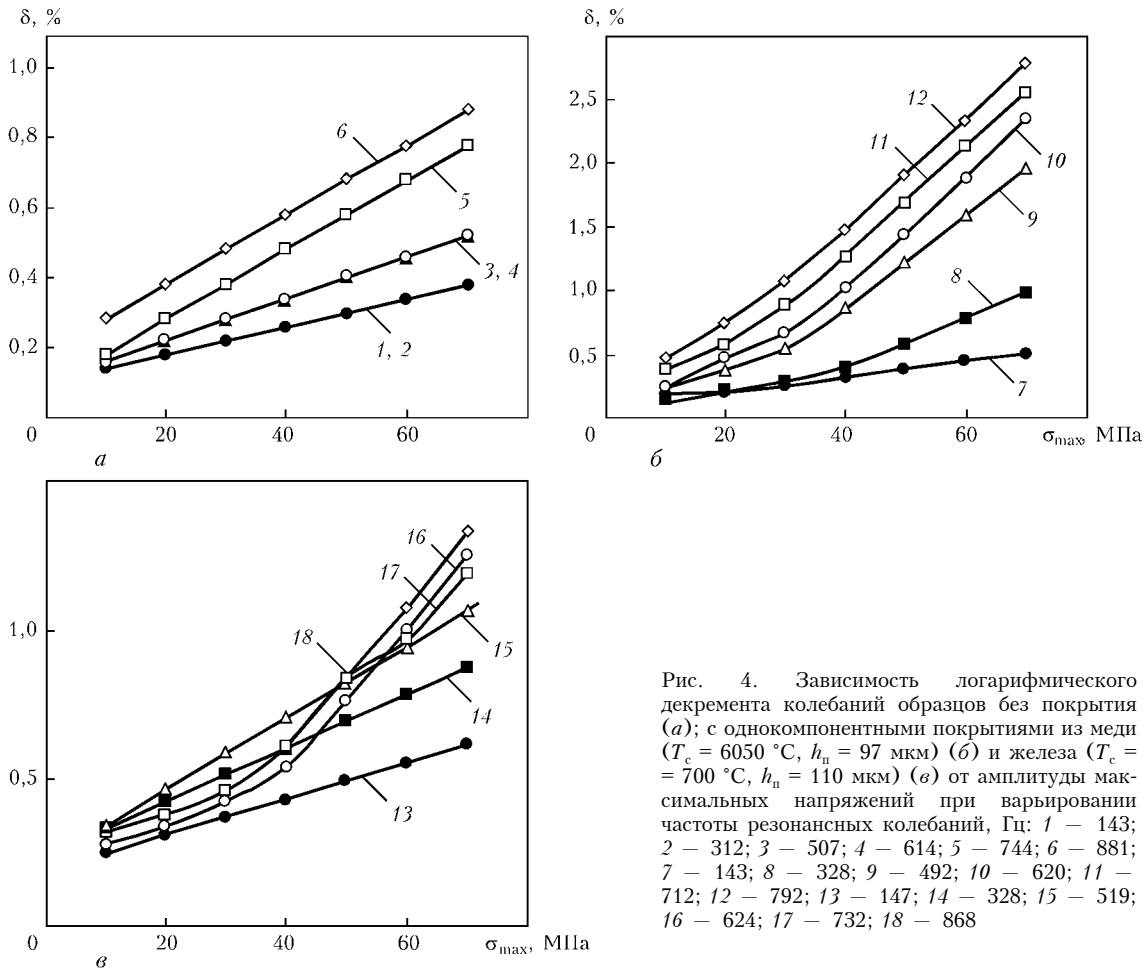


Рис. 4. Зависимость логарифмического декремента колебаний образцов без покрытия (а); с однокомпонентными покрытиями из меди ( $T_c = 6050 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $h_n = 97 \text{ мкм}$ ) (б) и железа ( $T_c = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $h_n = 110 \text{ мкм}$ ) (в) от амплитуды максимальных напряжений при варьировании частоты резонансных колебаний, Гц: 1 – 143; 2 – 312; 3 – 507; 4 – 614; 5 – 744; 6 – 881; 7 – 143; 8 – 328; 9 – 492; 10 – 620; 11 – 712; 12 – 792; 13 – 147; 14 – 328; 15 – 519; 16 – 624; 17 – 732; 18 – 868

В целом на основании полученных данных можно сделать вывод, что частотная зависимость логарифмического декремента колебаний образца больше характерна при осаждении медного покрытия. При этом степень его роста больше выражена для покрытий с крупными зёрнами и более высокими значениями амплитуды максимального напряжения. Для образцов с покрытием из железа указанная зависимость логарифмического декремента от частоты колебаний практически не зафиксирована, особенно при снижении амплитуды максимального напряжения.

В соответствии с постановкой работы, проанализируем результаты исследований по определению совместного влияния частоты колебаний и температуры эксплуатации на демпфирующую способность образцов с покрытиями. Решение задачи рассмотрим на примере покрытия из квазикристаллического сплава Al–Cu–Fe (более вероятного), в сравнении с однокомпонентными, для практической реализации, особенно для рабочих лопаток компрессоров АГТД.

Испытывали образцы при варьировании тех же технологических и эксплуатационных факторов, рассмотренных для однокомпонентных покрытий, а также температуры эксплуатации. Как и для однородных покрытий, получены амплитудные зависимости логарифмического декремента колебаний от амплитуды максимального напряжения, на основании анализа которых установлено, что демпфирующая способность образцов с рассматри-

ваемым покрытием при повышенной температуре может возрасти в три и более раз.

На основе полученных амплитудных зависимостей логарифмического декремента построили диаграмму его изменения в зависимости от частоты резонансных колебаний образца (рис. 6). Как следует из представленных данных, частота колебаний практически не оказывает влияния на демпфирующую способность образца с многокомпонентным покрытием из квазикристаллического сплава Al–Cu–Fe.

**Оценка циклической прочности титановых лопаток с покрытиями из наноструктурированной меди.** Высокий уровень и циклическая стабильность характеристик рассеяния энергии наноструктурированными конденсатами на основе меди, а также хорошая их адгезия по отношению к титановым сплавам позволяют рассматривать данные конденсаты в качестве возможной составляющей промежуточного слоя композитных защитных покрытий для лопаток АГТД.

На основе проведенных испытаний определены технологические режимы осаждения покрытий из меди на титановые лопатки, при которых обеспечивалось их наноструктурированное состояние. Исследовано влияние таких покрытий толщиной 5...10 мкм на устойчивость против разрушения титановых лопаток из сплава ВТЗ-1. Для сравнения, на другую часть лопаток осаждали покрытия из меди с микронным размером зёрен. Испытания проводили при температуре 20 °С и частоте колебаний



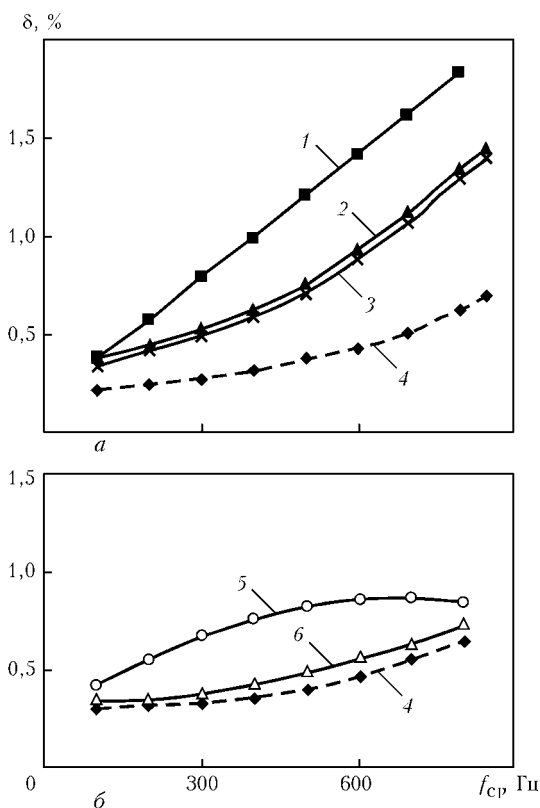


Рис. 5. Зависимость логарифмического декремента колебаний при амплитуде максимальных напряжений 50 МПа образцов с однокомпонентными покрытиями из меди (а) и железа (б) от средней частоты  $f_{cp}$  резонансных колебаний для различных параметров покрытия: 1 –  $T_c = 605^\circ\text{C}$ ,  $h_n = 97$  мкм; 2 –  $350^\circ\text{C}$ ,  $h_n = 150$  мкм; 3 –  $245^\circ\text{C}$ ,  $h_n = 170$  мкм; 4 – образец без покрытия; 5 –  $700^\circ\text{C}$ ,  $h_n = 110$  мкм; 6 –  $340^\circ\text{C}$ ,  $h_n = 102$  мкм

530 Гц. Циклическую усталость лопаток оценивали по ускоренной методике в условиях дискретного повышения амплитуды напряжений после каждых из  $5 \cdot 10^6$  циклов колебаний [13].

Положительное влияние на вибрационную устойчивость лопаток, имеющих покрытия с микронным размером зерен, отмечено для 50 % образцов. В случае же наноструктурированных покрытий положительный результат получен для всех образцов, причем 50 % из них не разрушались вплоть до окончания испытаний.

Приведенные результаты подтверждают предположение о том, что конденсаты на основе наноструктурированной меди могут быть использованы в качестве составляющих композитных покрытий, например связующих слоев между конструктивным элементом и основной частью покрытия.

**Выводы**

1. Показано, что демпфирующая способность образцов с покрытиями существенно зависит от их структуры и параметров получения, в первую очередь от температуры осаждения покрытия, а также частоты колебаний.

2. Установлено, что логарифмический декремент изгибных колебаний образца с наноструктурированным покрытием при повышенной температуре может возрасти в три и более раз, по сравнению с таковым при комнатной температуре.

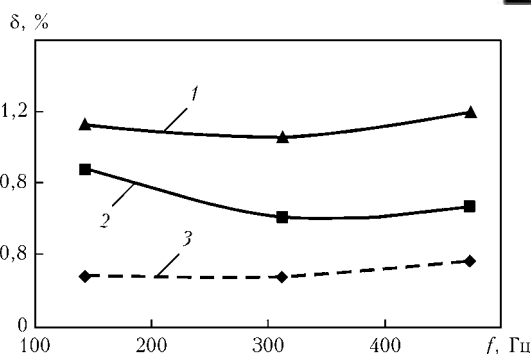


Рис. 6. Диаграмма изменения значения логарифмического декремента колебаний образца с покрытием из сплава Al–Cu–Fe ( $T_c = 500^\circ\text{C}$ ,  $h_n = 62$  мкм) от частоты  $f$  резонансных колебаний при амплитуде максимальных напряжений 45 МПа и температуре испытаний 350 (1) и 20 (2)  $^\circ\text{C}$ ; 3 – образец без покрытия

3. Необходим дальнейший поиск оптимальных наноструктуры покрытия и параметров ее получения для обеспечения максимальной демпфирующей способности конструктивных элементов машин типа рабочих лопаток компрессоров АГТД в условиях их эксплуатации.

1. Матвеев В.В. Демпфирование колебаний деформируемых тел. – Киев: Наук. думка, 1985. – 263 с.
2. Яковлев А.П. Диссипативные свойства неоднородных материалов и систем. – Киев: Наук. думка, 1985. – 248 с.
3. Устинов А.И., Скородзиевский В.С., Косенко Н.С. Изучение диссипативных свойств однородных материалов, осажденных в виде покрытий. Сообщение 2. Конденсаты меди с различными характеристиками микроструктуры // Пробл. прочности. – 2008. – № 2. – С. 149–159.
4. Paton В.Е., Movtchan В.А. Composite materials deposited from the vapour phase in vacuum soviet technologies review // Weld and Surfacing. – 1991. – N 2. – P. 43–64.
5. Effect of the addition of crystalline  $\beta$ -phase in Al–Cu–Fe quasicrystalline coating on their tribological properties / M. Sales, A. Merstallinger, A.I. Ustinov et al. // Surf. and Coat. Tech. – 2007. – N 201. – P. 6206–6211.
6. Mechanical properties of quasicrystalline Al–Cu–Fe coatings with submicron-sized grains / Yu.V. Milman, D.V. Lotsko, S.N. Dub et al. // Ibid. – P. 5937–5943.
7. Ustinov A.I., Skorodzievski V.S., Fesiun E.V. Damping capacity of nanotwinned copper // Acta Materialia. – 2008. – N 56. – P. 3770–3776.
8. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопровитвлению материалов. – Киев: Наук. думка, 1988. – 734 с.
9. Устинов А.И., Мовчан Б.А., Скородзиевский В.С. Исследование демпфирующей способности плоских образцов из титанового сплава Ti–6%Al–4%V с покрытиями из олова и иттрия // Пробл. прочности. – 2001. – № 4. – С. 55–61.
10. Устинов А.И., Скородзиевский В.С., Косенко Н.С. Изучение диссипативных свойств однородных материалов, осажденных в виде покрытий. Сообщение 1. Метод определения амплитудной зависимости истинного декремента колебания материала покрытия // Там же. – 2007. – № 6. – С. 134–143.
11. Прочность материалов и конструкций / А.А. Лебедев, В.Т. Троицкий, В.В. Матвеев и др. – Киев: Академ-періодика, 2005. – 1008 с.
12. Kaschner G.C., Gibeling J.C. Evolution of dislocation glide kinetics during cycling deformation of copper // Acta Materialia. – 2002. – N 50. – P. 653–662.
13. Матохнюк Л.Е. Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением. – Киев: Наук. думка, 1988. – 200 с.

Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев  
 Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко  
 НАН Украины, Киев  
 Ин-т металлофизики им. Г.В. Курдюмова  
 НАН Украины, Киев  
 Поступила 14.01.2010



## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПЛАВКИ МОЛИБДЕНА

В. О. Мушегян

Описана электронно-лучевая установка промышленного типа МВ-1. Приведены технические характеристики установки. Изложены функциональные особенности узлов установки: рабочих камер, технологической оснастки, электронных пушек.

Electron beam installation of MV-1 industrial type is described. Technical characteristics of the installation are given. Functional peculiarities of such installation components as: working chambers, technological fixture, electron guns are described.

**Ключевые слова:** электронно-лучевой переплав; установка; промежуточная емкость; природ; молибден

Плавка молибдена представляет собой сложную техническую задачу вследствие высокой температуры плавления (2617 °С) и повышенных требований по чистоте металла от примесей [1]. В мировой практике для выплавки слитков молибдена применяют вакуумно-дуговой или электронно-лучевой переплавы, в которых в качестве защитной среды используют вакуум и концентрированные источники энергии (электрическую дугу и электронный луч).

Вакуумно-дуговой переплав в разряженной атмосфере инертного газа отличается ограниченными возможностями по очистке исходного молибденового сырья от вредных примесей и газов, поэтому для него требуются шихтовые материалы высокой чистоты. Электронно-лучевую плавку производят при более высоком вакууме, что обеспечивает высокую степень очистки металла [2].

Особенно эффективен электронно-лучевой переплав с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) [3], который благодаря пространственному разделению процессов плавления, рафинирования и кристаллизации металла позволяет выдерживать расплав металла в промежуточной емкости в течение времени, необходимого для его рафинирования до заданного уровня чистоты.

Для достижения максимального эффекта от реализации метода ЭЛПЕ в области плавки тугоплавких металлов необходимы новые установки промышленного типа, сочетающие высокую производительность вакуумной системы с большой удельной мощностью электронных лучей. В Институте электросварки им Е. О. Патона накоплен богатый опыт по созданию таких установок.

Армения богата молибденом, который добывают на медно-молибденовых рудниках. Металлический молибден в виде восстановленного порошка произ-

водят на заводе ОАО «Чистое железо» (Ереван) в виде брикетов ТУ РА28-54-529-61-661-2007. Для дальнейшей очистки молибдена от примесей и получения качественных слитков, готовых для деформации в полуфабрикат, потребовалась плавильная установка.

С этой целью в НТЦ «Патон-Армения» Института электросварки им. Е. О. Патона создали электронно-лучевую установку МВ-1 (рис. 1), способную эффективно плавить тугоплавкие металлы и их сплавы.

Установка конструктивно состоит из плавильной камеры (камеры плавки), камеры загрузки и камеры слитка. Все элементы конструкции выполнены с полыми стенками, в которых циркулирует вода для принудительного охлаждения во время плавки и остывания слитка. Кроме того, установка оснащена блоком питания электронно-лучевых нагревателей, системами управления и стабилизации электронных лучей, вакуумной системой. Ниже приведены основные технические параметры установки.

### Технические характеристики электронно-лучевой установки МВ-1

Максимальная мощность, кВт.....	480
Ускоряющее напряжение, кВ.....	30
Количество пушек, шт. ....	4
Наибольшие размеры заготовки, м:	
длина.....	2,2
сечение .....	0,5×0,45
Наибольшие размеры слитков, м:	
длина.....	2,0
диаметр.....	0,13
прямоугольного сечения.....	0,2×0,3
Производительность высоковакуумной системы откачки, л/с.....	15000
Рабочий вакуум в камере плавки, Па.....	1·10 <sup>-2</sup>
Максимальный расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч.....	40
Габариты установки, м.....	5×7×5

Камера плавки является центральной частью установки, в которой непосредственно осуществляют

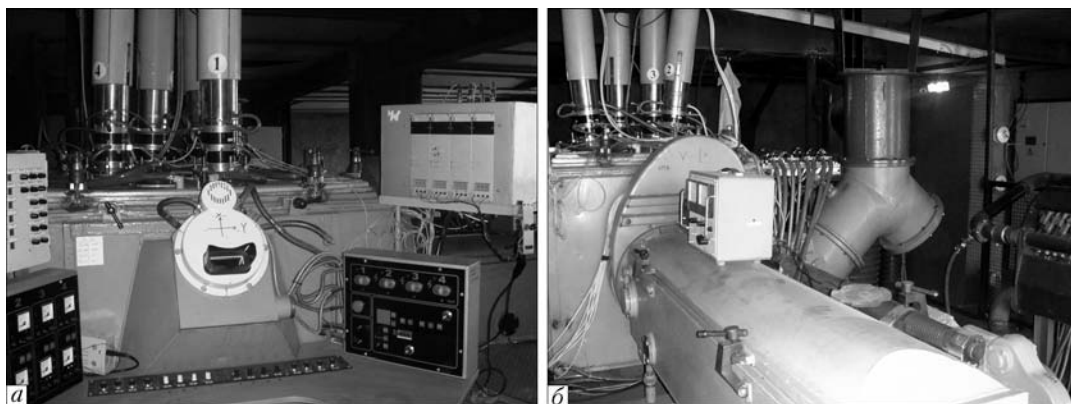


Рис. 1. Электронно-лучевая установка МВ-1: а — пульт оператора; б — вид со стороны камеры загрузки

процесс плавки. Она представляет собой вертикально расположенный прямоугольник 1,5×0,9 м, ограниченный сверху и снизу вакуумно-плотными крышками. Толщина стенок камеры позволяет полностью исключить проникновение наружу вторичного рентгеновского излучения, вызванного торможением электронов о переплавляемый материал.

Внутри камеры находится технологическая оснастка, состоящая из промежуточной емкости, припода и кристаллизатора (рис. 2). На верхней крышке установлены электронно-лучевые пушки ВТР (4 шт.).

**Технические характеристики пушки ВТР**

Номинальная мощность, кВт.....	100
Рабочая частота развертки, Гц.....	50
Максимальная сила тока, А.....	4
Угол отклонения пучка от оси пушки, град.....	0... 10
Рабочий газ.....	смесь водорода и кислорода
Максимальный расход газа, л/ч.....	1,0
Диаметр пятна в фокусе пучка, мм.....	10... 20

Во время проведения регламентно-технологических работ верхняя плита может перемещаться с помощью цехового крана для чистки внутренних поверхностей крышки и пушек от возгонов, которые там осаждаются в процессе плавки.

К технологическому отверстию в нижней крышке присоединена камера слитка. Через имеющиеся на боковой стенке камеры штуцеры охлаждающая вода подается в элементы технологической оснастки с помощью системы медных патрубков.

На боковой стенке камеры установлена смотровая система (стробоскопического типа) оператора. Напротив оператора в стенке камеры имеется патрубок ДУ 400, через который с помощью вакуумного затвора камера плавки соединяется с откачной системой. Справа от оператора камера плавки соединяется с камерой загрузки также с помощью вакуумного затвора ДУ 400.

Камера загрузки представляет собой полый параллелепипед с крышкой, оснащенной вакуумным уплотнением. Общая длина камеры загрузки составляет 2,2 м. Для проведения операции загрузки шихты указанные части камеры расстыковываются после освобождения зажимов, расположенных по периметру уплотнения, после чего крышку открывают для загрузки шихты. В камере загрузки раз-

мещен механизм подачи шихты, позволяющий подавать цельную заготовку, расходуемый короб с шихтовыми материалами, кусковую шихту и насыпные материалы (например, порошок восстановленного молибдена).

В двух первых случаях на направляющих устанавливают рольганг, по которому толкатель подает заготовку в зону плавки. В случае раздельной шихты на направляющие устанавливают нерасходуемый короб, ширина которого не превышает таковую задней стенки промежуточной емкости, и толкатель равномерно сбрасывает шихтовые материалы в промежуточную емкость.

Камера слитка представляет собой полый прямоугольник 0,7×0,7×2,2 м, который крепится к нижней крышке камеры с помощью фланца. В камеру слитка через вакуумное уплотнение снизу вводят шток, на верхней части которого расположен медный водоохлаждаемый поддон. Поддон конструктивно закреплен в камере слитка с помощью двух траверс, соединенных между собой винтовыми тягами.

Снаружи камеры слитка расположен привод, который через винтовые тяги сообщает штоку вертикальное перемещение для вытягивания слитка в процессе плавки. Привод состоит из электродвигателя и редуктора. На поддоне перед началом плавки крепятся «закладные», изготовленные из материала выплавляемого слитка.

В нижней части камеры слитка размещен технологический люк, посредством которого обеспечивается доступ к внутренним частям механизма вытягивания. Через данный технологический люк производится установка закладных перед плавкой и освобождение готового слитка из закрепления после плавки перед его извлечением из установки.

Технологическая оснастка, где происходит процесс электронно-лучевого переплава, состоит из промежуточной емкости, припода и кристаллизатора. Промежуточная емкость (холодный под) представляет собой медную водоохлаждаемую поверхность, ограниченную стенками, в одной из которых выполнен проем для слива жидкого металла (сливной носок). В нее электронными лучами сплавляется шихта, подаваемая из камеры загрузки.

Промежуточная емкость служит для усреднения химического состава, рафинирования расплава от

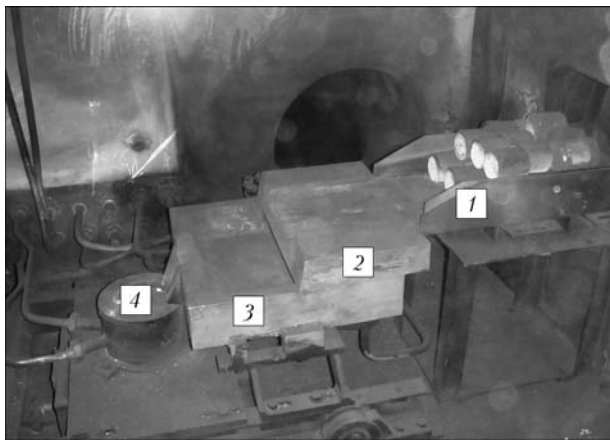


Рис. 2. Технологическая камера с оснасткой: 1 – короб с шихтой (брикеты молибдена); 2 – припод; 3 – промежуточная емкость; 4 – кристаллизатор

примесей (в том числе и газовых) и включений [3]. В процессе плавки на дне промежуточной емкости образуется гарнисаж, предохраняющий стенки и дно от взаимодействия с расплавленным металлом.

Металл из промежуточной емкости сливается в кристаллизатор, представляющий собой полый замкнутый контур (проем), внутренняя часть которого, контактирующая с металлом слитка, выполнена из водоохлаждаемой меди. Промежуточная емкость, припод и кристаллизатор составляют единый узел, смонтированный на стальной раме, закрепленной в камере плавки.

Конструктивная схема крепления оснастки внутри камеры позволяет оперативно заменять ее узлы (переходить на другие размеры слитка).

Вакуумная система установки МВ-1 включает вакуумные магистрали, затворы и насосы: механические, пароструйные и диффузионные. Магистрали состоят из стальных труб, соединяющих насосы как между собой, так и с камерой плавки, пушками, и обеспечивают необходимые проходные сечения для максимального использования производительности насосов.

Вакуумирование внутренних полостей камер установки от уровня атмосферного давления осуществляется механическим насосом АВЗ-125Д. Производительность насоса позволяет достичь в камере плавки уровня остаточного давления  $3 \cdot 10^4$  Па в течение 10 мин. Для дальнейшего вакуумирования установки и удаления газов и паров металла во время процесса плавки используется основная вакуумная магистраль, состоящая из следующих типов насосов:

АВЗ-125Д – 2 шт.

2ДВН1500 – 1 шт.

2НВБМ400 – 2 шт.

Вакуумная система установки МВ-1 позволяет создавать разрежение в объеме плавильной камеры ( $1 \cdot 10^{-2}$  Па), обеспечивающее бесперебойную работу пушек и необходимую степень рафинирования переплавляемого металла в течение всего технологического процесса.

Главной технической особенностью электронно-лучевой установки МВ-1 является возможность плавки тугоплавких металлов – высокая удельная мощность электронно-лучевого нагрева относительно объема камеры плавки и конструктивные решения технологической оснастки, позволяющие эффективно производить дегазацию и плавку исходного сырья.

Наличие четырех пушек ВТР общей мощностью 480 кВт обеспечивает удельную мощность потока электронов в промежуточной емкости на уровне  $2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, а в зоне плавки брикетов восстановленного порошка молибдена –  $3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, что вполне достаточно для тугоплавких металлов.

При необходимости установка позволяет создавать в точке электронную бомбардировку удельной мощностью  $5 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>. Для повышения производительности электронно-лучевой плавки тугоплавких металлов необходимо осуществлять дегазацию исходной шихты [4].

С этой целью технологическая оснастка в электронно-лучевой установке МВ-1 дополнена медной водоохлаждаемым приподом (подложкой) значительной протяженности (рис. 2), на котором происходит предварительный нагрев и частичное плавление брикетов молибдена под действием электронных лучей.

Установка оснащена стробоскопической системой наблюдения за процессом плавки с использованием внешнего привода, что позволяет вести визуальный контроль и осуществлять обслуживание смотровой системы без прерывания технологического процесса.

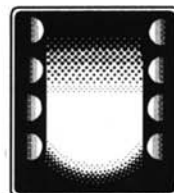
Электронно-лучевая установка МВ-1 является высокопроизводительным агрегатом промышленного типа для плавки металлов и сплавов с промежуточной емкостью. В качестве шихтовых материалов могут быть использованы как цельная расходуемая заготовка, так и кусковые отходы, насыпные материалы. Высокая удельная мощность электронных пучков позволяет эффективно плавить тугоплавкие металлы и сплавы на их основе. Благодаря возможности оперативной замены технологической оснастки на установке можно выплавлять слитки как круглого, так и прямоугольного сечений.

1. *Молибден в ядерной энергетике* / Под ред. чл.-кор. АН СССР В. С. Емельянова и д-ра техн. наук проф. А. И. Евстюхина. – М.: Атомиздат, 1977. – 160 с.
2. *Мовчан Б. А., Тихоновский А. Л., Куратов Ю. А. Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов.* – Киев: Наук. думка, 1972. – 240 с.
3. *Электронно-лучевая плавка* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. – Киев: Наук. думка, 1997. – 265 с.
4. *Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В. Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорекрационных металлов.* – Киев: Наук. думка, 2008. – 306 с.

ГП НТЦ «Патон Армения»

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

Поступила в редакцию 15.12.2009



УДК 669.187.58

## ПЛАВИЛЬНО-РАЗЛИВОЧНЫЙ КОВШ С ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВОМ

**В. А. Шаповалов, Ф. К. Биктагиров, А. П. Игнатов,  
В. И. Колесниченко, О. В. Карускевич, Ю. А. Никитенко,  
В. В. Якуша, А. В. Гнатушенко, А. Н. Гниздыло**

Приведены результаты разработки переносного плавильно-разливочного модуля. Показана принципиальная возможность создания агрегатов ковш-печь с индукционным нагревом для плавки, обработки и транспортировки жидкой стали.

Results of development of a portable melting-pouring module are given. The principal feasibility of creation of units of a ladle-furnace type with induction heating for melting, treatment and transporting of molten steel is shown.

**Ключевые слова:** ковш-печь; дуговой нагрев; индукционный нагрев; конструкция

В современном металлургическом производстве сталь, выплавленная в том или ином агрегате с целью доводки и рафинирования, подвергается обработке на установках типа ковш-печь. При этом для компенсации тепловых потерь в процессе данной и будущих обработок (вакуумирование, транспортировка, разливка) применяется дуговой нагрев, при котором тепло передается верхним слоям металла.

Поэтому для усреднения температуры по высоте ковша, как правило, используют донную продувку металла аргоном с соответствующим техническим исполнением (аргонопровод, пористые вставки, регулирующая и контролирующая аппаратура и т. д.).

Особенностью дугового нагрева является местный подэлектродный перегрев расплава, приводящий к угару легирующих элементов, а также высокий уровень тепловых нагрузок на свод и верхний пояс ковша, способствующие преждевременному износу футеровки.

Для соблюдения режимов разливки и обеспечения высокого качества получаемой стальной заготовки температуру металла в сталеразливочном ковше необходимо поддерживать в определенных (довольно узких) пределах. Чрезмерное понижение температуры металла в ковше приводит к зарастанию разливочного стакана, а перегрев металла над температурой разливки — к сокращению срока службы ковша и необоснованным энергозатратам.

При дуговом нагреве с учетом его особенностей обеспечить равномерную и заданную температуру металла по всему объему ковша довольно сложно. С этой точки зрения предпочтительным является

индукционный нагрев, при котором возможна плавная регулировка мощности нагрева, а металл в ковше интенсивно перемешивается за счет электромагнитных сил, обеспечивая однородность температурного поля.

Кроме того, при индукционном нагреве можно совмещать во времени операции нагрева и вакуумирования, что положительно сказывается на себестоимости металлургической продукции.

Что касается наведения рафинировочного шлака в ковше при индукционном нагреве, то для этого можно использовать тот же электродуговой или электро-шлаковый нагрев, но значительно меньшей мощности, по сравнению с чисто электродуговым нагревом всего объема ковша, применяют и газовый обогрев, в том числе так называемыми факельно-шлаковыми горелками [1].

Ковш-печь с индукционной или гибридной схемой нагрева позволяет обрабатывать стали с заданной температурной скоростью, сокращать время обработки, а температуру металла поддерживать в точно заданных пределах. Индукционный нагрев можно использовать и для работы сталеразливочного ковша в режиме «миксера», например при ожидании его подачи на позицию разливки или в случае сбоя цикла разливки.

При создании такого агрегата необходима разработка конструкции ковша с возможностью его транспортировки с позиции на позицию, т. е. с разделением классической схемы «индукционная тигельная печь» на две независимые единицы — стационарный нагреватель и мобильный ковш. В этом случае неводоохлаждаемый корпус ковша должен быть «прозрачным» для электромагнитного поля. Существующие разработки предусматривают изготовление корпуса из ме-

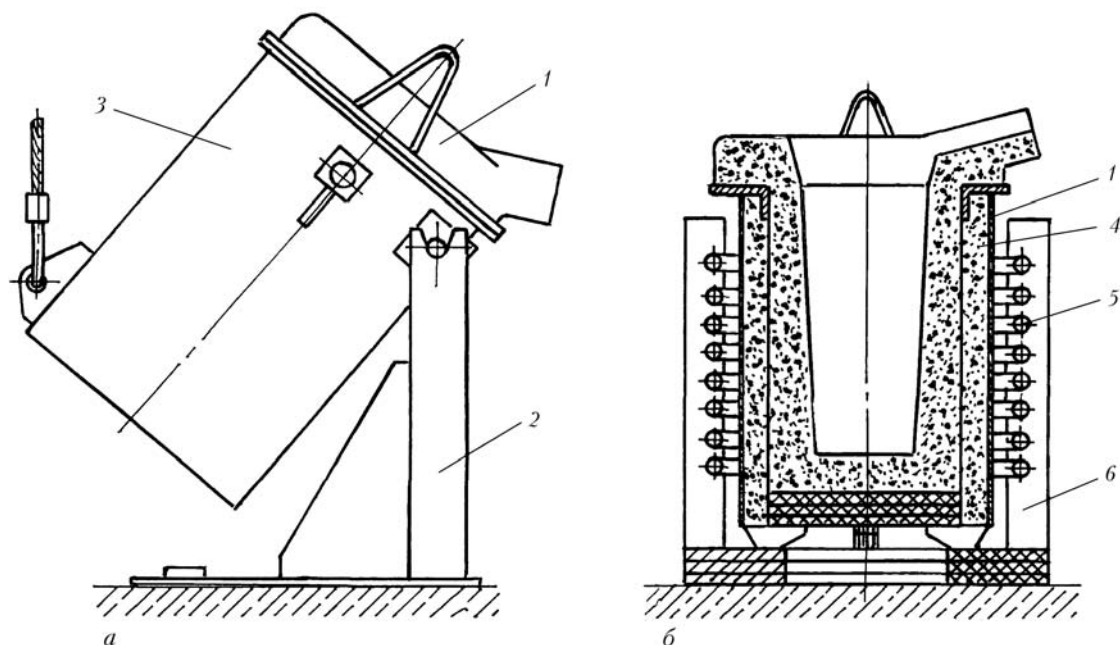


Рис. 1. Схема лабораторного плавильно-разливочного модуля (а) с индукционным нагревом металла в ковше-печи (б): 1 — ковш; 2 — механизм наклона; 3 — «стакан»; 4 — футеровка; 5 — индуктор; 6 — стойки для крепления индуктора

таллических немагнитных материалов, например нержавеющей стали или титана, что, однако, приводит к существенному увеличению стоимости ковша и не исключает частичного экранирования электромагнитного поля, а также потерь мощности.

В патенте [2] предложено корпус индукционного ковша, кроме донной и верхней частей, изготавливать из немагнитных материалов (огнеупорных бетонов). Такие ковши, однако, могут применяться преимущественно при разливке легкоплавких металлов, а для сталеплавильного производства малоприспособны. Поэтому потребовалось создание плавильно-разливочного модуля с индукционным нагревом, позволяющего разделить нагреватель и ковш, характеризующийся высокой эксплуатационной прочностью корпуса.

За основу разработки взята конструкция корпуса ковша в виде металлического каркаса типа «белые колесо». Отдельные элементы такого каркаса представляют собой пакеты из электрически изолированных полос немагнитной стали, жестко скрепленных между собой, толщиной менее глубины

проникновения тока, наводимого индукционным нагревателем.

Пространство между металлическим каркасом заполняется огнеупорным материалом, формирующим тигель ковша. Благодаря наличию металлического каркаса такой ковш имеет высокую прочность, при этом сам корпус практически не экранирует электромагнитное поле индуктора [3].

Для принципиальной проверки работоспособности указанного ковша разработано и создано лабораторное оборудование (рис. 1). С учетом имеющегося источника питания (машинного преобразователя частотой 8 кГц и мощностью 100 кВт) выбраны следующие геометрические параметры ковша: внутренний диаметр — 120...150 мм; высота — 400 мм; футеровка — набивная магнезитовая; толщина футеровки — 30...50 мм; масса жидкого металла — до 30 кг. Кольцевой многослойный индуктор изготавливали из медной трубки в виде спирали. Индуктор не связан с ковшом и прикреплен к несущим стойкам. В лабораторных условиях слив жидкого металла из ковша осуществляли через носок путем его опрокидывания на специальном разливочном модуле с механизмом наклона установленного в «стакан» ковша под углом 90° (рис. 1, б). Общий вид такого плавильно-разливочного модуля показан на рис. 2.

В процессе работы ковш, предварительно заполненный выплавленным металлом, устанавливали внутри индуктора. Подавали питание на индуктор и осуществляли нагрев металла до требуемой температуры с одновременным его легированием и рафинированием.

После достижения заданной температуры и завершения технологических операций отключали питание индуктора, ковш извлекали из него и перемещали на позицию разливки, где и происходил слив металла в изложницу. При необходимости перед этим скачивали шлак.



Рис. 2. Общий вид плавильно-разливочного модуля: 1 — индуктор; 2 — ковш; 3 — разливочный модуль

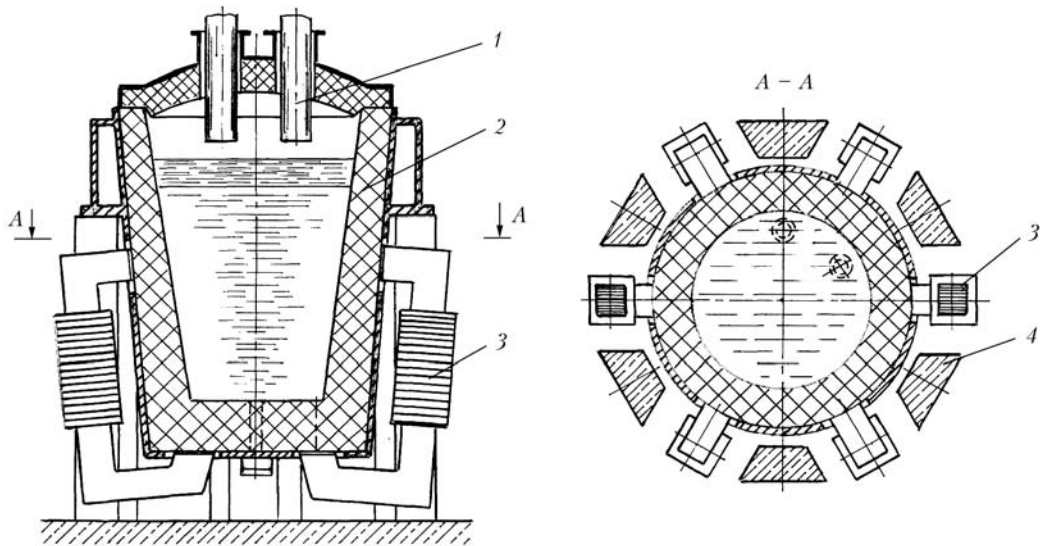


Рис. 3. Схема гибридного индукционного ковша-печи с магнитопроводами: 1 — дуговой нагреватель; 2 — ковш; 3 — магнитопровод; 4 — опора ковша

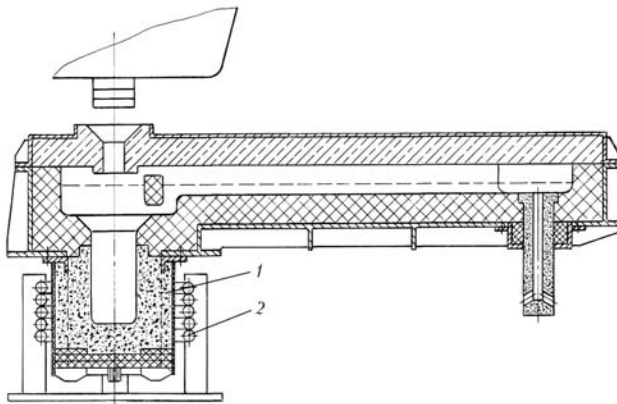


Рис. 4. Схема индукционного нагрева в промежуточном ковше: 1 — нагревательный узел; 2 — индуктор

Проведенные испытания с изменением режимов нагрева и марок обрабатываемой стали показали полную работоспособность и безопасность разработанной конструкции. Созданная технологическая схема и оборудование позволяют не только выдерживать расплав при определенной температуре для проведения металлургических операций, но и с учетом запаса мощности индукционного источника расплавлять шихтовую загрузку без снижения несущей способности ковша [4].

Таким образом, в перспективе возможно внедрение различных вариантов конструкций ковша и индуктора в зависимости от объема. Предварительные расчеты показали, что для ковшей вместимостью 10... 20 т предпочтительным является стационарный кольцевой индуктор, а для ковшей вместимостью более 50 т — стационарная система магнитопроводов с индивидуальными индукторами (рис. 3). При этом с целью стыковки магнитопроводов в корпусе ковша необходимо предусмотреть наличие специальных «окон», прозрачных для электромагнитного поля.

Кроме того, корпус ковшей с индукционным обогревом может иметь грушевидную форму для уменьшения тепловых потерь, в том числе с зеркала

металла, и улучшения перемешивания металлической ванны. Грушевидная форма является более предпочтительной и с точки зрения распределения напряжений в кожухе ковша.

Индукционный нагрев можно использовать и для поддержания заданной температуры металла в промежуточном ковше (рис. 4), также предусматривается разделение нагревательного узла и стационарно установленного индуктора.

На основе проведенных исследований и анализа литературных источников можно сделать вывод о том, что применение индукционного нагрева переносного агрегата ковш-печь позволяет усреднить и плавно регулировать температуру металла во всем объеме; сократить длительность обработки металла в 2 раза; совместить операцию нагрева с обработкой металла вакуумом и шлаками, продувкой газом, рафинированием и долегированием; снизить угар металла и легирующих вследствие исключения локального перегрева металла; сократить потребление электроэнергии на дополнительный перегрев металла; продлить срок службы ковша и сэкономить энергоузоры; уменьшить техногенную нагрузку на окружающую атмосферу.

1. Дудко Д. А., Крутиков Р. Г., Прохоренко К. К. Комплексное улучшение качества стальных слитков. — Киев: Техника, 1969. — 180 с.
2. Пат. 4618964 US, МПК Н 05 В 5/16. Ladle or tundish / H. G. Larsson, E. Ewstman, A. Ostlund. — Publ. 21.10.1986.
3. Пат. 36318 Україна, МПК В 22 D 41/005. Пристрій для нагріву, транспортування і розливу рідкого металу / Б. Є. Патон, В. О. Шаповалов, В. І. Колесніченко та ін. — Опубл. 27.10.2008, Бюл. № 20.
4. Ковш-печь с индукционным нагревом / В. А. Шаповалов, Ф. К. Биктагиров, В. И. Колесниченко и др. // Ключевые проблемы развития электрометаллургической отрасли: II междунар. науч.-техн. конф. (Киев, 23–24 апреля 2009 г.). — Киев, 2009. — С. 44.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
Поступила 18.01.2010



УДК 669.187.2

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА РЕАКЦИИ СВС В НАНОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛАХ (ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ).

### 1. Одностадийная реакция

Т. В. Запорожец, А. М. Гусак, А. И. Устинов

Предложены самосогласованная по температурному профилю и упрощенная аналитическая модели стационарного режима СВС в мультислойной наноструктуре, основанные на использовании кинетики реакционного роста фаз в тонких пленках в неизотермических условиях.

Self-consistent by a temperature profile and simplified analytic models of stationary mode SHS in multi-layer nanostructure based on application of kinetics of a reaction growth of phases in thin films under non-isothermal conditions are offered.

**Ключевые слова:** самораспространяющийся высокотемпературный синтез; реакционная диффузия; теплопроводность; фазообразование; нанопленки

В последнее время процессы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) довольно активно исследуются на наноуровне не только в порошковых системах [1], но и в мультислойных структурах. Интерес к таким структурам обусловлен возможностью их использования в качестве промежуточных слоев при формировании неразъемных соединений трудносвариваемых материалов, например композитов или интерметаллидов [2, 3].

Интенсивное тепловыделение в процессе протекания реакции СВС в мультислойных системах на основе интерметаллидообразующих компонентов позволяет их применять и в качестве локальных источников нагрева в процессе пайки [4]. Не менее перспективным представляется их использование в качестве исходного материала при изготовлении тонкой интерметаллической фольги.

Для обеспечения требуемых параметров протекания твердофазных реакций в мультислойной структуре необходимо учитывать ряд факторов, таких как химический и концентрационный составы фольг, их толщину и период мультислоя, условия напыления фольги (степень неравновесности дефектов, наличие промежуточных фаз и вероятность их возникновения), параметры инициации реакции (температура и время поджога).

Экспериментальное решение указанной задачи требует постановки большого количества экспериментов. Одним из путей ее упрощения может быть построение теоретических моделей, которые позволят прогнозировать характеристики фронта горения в процессе СВС в зависимости от условий проведения эксперимента.

В общем случае реакции СВС следует рассматривать в нестационарных условиях, поскольку системы, в которых он реализуется, как правило, имеют сложные фазовые диаграммы. При этом возможен одновременный или последовательный рост фаз и, как результат, конкуренция экзо- и эндотермических процессов с меняющейся локальной температурой, которая в свою очередь переопределяет ход эволюции фазообразования. При этом поведение системы становится сложнопрогнозируемым, а большое количество изменяемых параметров усложняет поиск требуемого режима СВС.

Возможное решение такой задачи авторы видят в создании симуляционной модели самосогласованного решения уравнений теплопроводности и диффузии с учетом фазовых характеристик, дискретно меняющихся во времени и пространстве.

Это связано с тем, что диффузионные параметры фаз и их термодинамические стимулы превращения, с одной стороны, зависят от температурного и концентрационного полей, а с другой, — влияют на них вследствие экзо- или эндотермических превращений. Подготовительным этапом построения такой



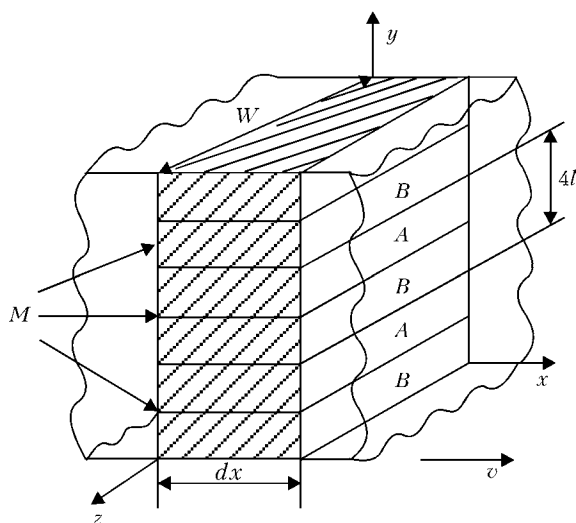


Рис. 1. Геометрия образца мультислойной бинарной пленки

модели является разработка серии простых феноменологических моделей для описания частных случаев структуры фронта горения реакции СВС.

Поскольку диффузионный перенос продукта горения в направлении распространения фронта практически отсутствует [1], то за время протекания диффузионного процесса в направлении, поперечном к распространению фронта горения, сам фронт пройдет в  $\sqrt{a^2/D} \sim 10^3$  раз большее расстояние ( $a^2$  — коэффициент температуропроводности;  $D$  — коэффициент диффузии). Это позволяет разбить профиль фронта горения на требуемое количество интервалов, чтобы на каждом из них рассматривать температуру постоянной, диффузионный процесс изотермическим, а время прохождения фронта достаточным для образования конечного продукта твердофазного горения.

Например, в системе Al/Ni чаще встречается последовательность образования равновесных фаз с увеличением содержания никеля и выделением тепла при условии достаточного количества реагентов как для взаимной диффузии в объемных образцах [5], так и при взаимодействии в тонких пленках [6–8]. Если предположить, что внешний теплоотвод и потери тепла при плавлении алюминия несущественны, то образуемая конечная фаза будет определяться начальным составом фольги.

Целью данной работы является создание феноменологического описания стационарного распространения плоского фронта в результате образования одной промежуточной фазы. Модель должна прогнозировать основные параметры (скорость распространения фронта и температуру в нем) исходя из характеристик мультислойной структуры (периода мультислоев, соотношения количества компонентов, степени неравновесности структуры). Решение обратной задачи позволит находить оптимальные параметры структуры для получения требуемых скорости, температуры фронта и (при необходимости) продуктов реакции СВС с заданными свойствами.

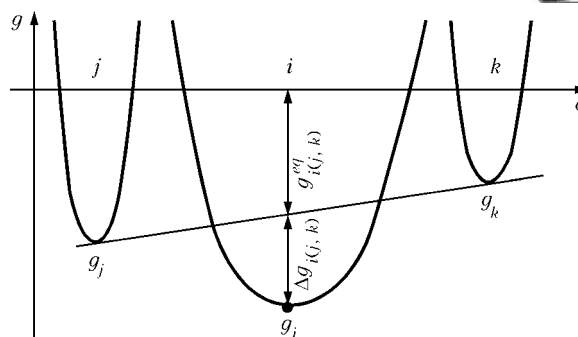


Рис. 2. Термодинамический стимул:  $\Delta g_{i(j,k)}$  — свободная энергия, высвобождающаяся в пересчете на атом при образовании фазы  $i$  из фаз  $j$  и  $k$  при соблюдении закона сохранения вещества; вычисляется как разность между потенциалом Гиббса (на атом)  $i$ -той фазы  $g$  и потенциалом  $g_{i(j,k)}$  смеси соседних фаз  $j$ , а также  $k$  соответствующего состава

Построение модели процессов в нанослойной структуре позволяет непосредственно использовать законы взаимной и реакционной диффузии с поправкой на пространственную неоднородность температурного поля [9], в то время как в порошковых системах приходится использовать общие уравнения химической кинетики с некоторыми подгоночными коэффициентами (трактовка которых не всегда однозначна).

Рассмотрим нанослойную двухкомпонентную фольгу в виде чередующихся  $M$  слоев компонентов  $A$  и  $B$  (рис. 1) шириной и периодом мультислоя  $4l$ , где  $l$  соответствует половине толщины слоя одного компонента (толщины слоев  $A$  и  $B$  равны).

В отличие от подхода взаимной диффузии, использованного в работе [9], примем, что тепло выделяется не во всем объеме, а только на движущихся межфазных границах. При этом для создания модели распространения фронта используются уравнения реакционной диффузии, что целесообразнее при образовании промежуточных соединений с узкими областями гомогенности в процессе СВС.

Можно выделить следующие основные положения феноменологической модели:

фронт распространения реакции плоский и стационарный;

все фазовые границы по концентрации и по температуре соответствуют равновесной диаграмме состояний;

при прохождении фронта образуется одна фаза; диффузионные потоки во фронте направлены в основном перпендикулярно к направлению его распространения (при условии, что ширина фронта горения намного больше периода мультислоя);

образующаяся фаза имеет узкий интервал гомогенности с близкими значениями концентраций  $c_{left}$ ,  $c_{right}$  ( $\Delta c \equiv c_{right} - c_{left} \ll 1$ ) на границах  $x_{left}$ ,  $x_{right}$ . В этом случае применимо приближение постоянности потока [10], т. е. плотности потоков  $J_{left}$ ,  $J_{right}$  на левой и правой границах практически равны между собой и равны плотности потока внутри фазы. Эта плотность потока определяется интеграль-

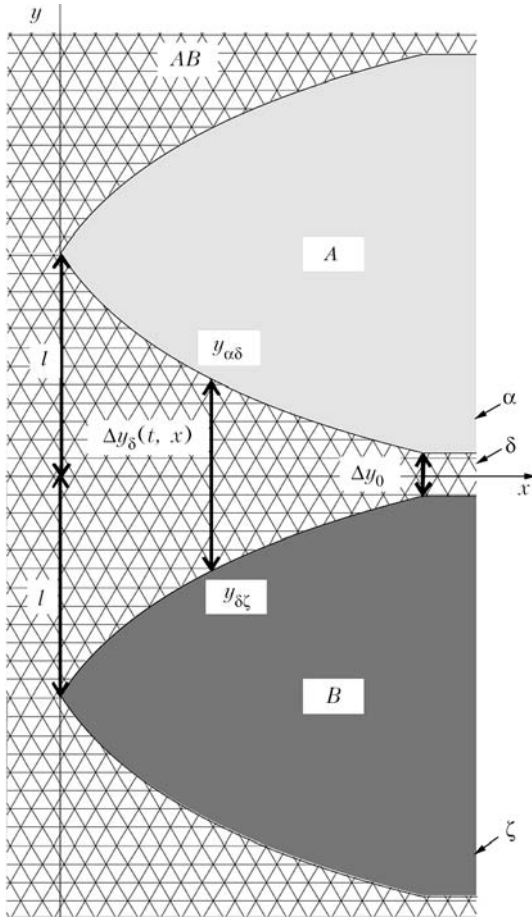


Рис. 3. Геометрия модели роста промежуточной δ-фазы

но, т. е. через среднее значение  $\bar{D}$  концентрационной зависимости коэффициента диффузии  $D(c)$ :

$$J_{left} \sim J_{right} \sim J = - \frac{\frac{1}{\Omega} \int_{c_{left}}^{c_{right}} D(c) dc}{x_{right} - x_{left}} = - \frac{\frac{1}{\Omega} \bar{D} \Delta c}{x_{right} - x_{left}}, \quad (1)$$

где  $\Omega$  — атомный объем;

отсутствует теплоотвод через внешние поверхности мультислоя.

Рассмотрим рост промежуточной δ-фазы между α-фазой (твердый раствор на основе A) и ζ-фазой (твердый раствор на основе B) с термодинамическим стимулом на один атом  $\Delta g_{\delta(\alpha, \zeta)}$  (рис. 2) [11]. Термодинамический стимул зависит от температуры, но в расчетах выбран константой из-за недостаточных фактических данных. Поскольку фольга имеет периодическую структуру, то выберем минимальный период толщиной  $2l$ , где  $l$  —  $1/4$  периода мультислоя;  $\Delta y_0$  — исходная толщина слоя фазы, образовавшегося до прохождения реакции СВС (рис. 3).

В тонком сечении  $dx$ , перпендикулярном направлению распространения фронта, за время  $dt$  образование фазы пройдет в прослойке  $d\Delta y_{\delta}(x)$ , содержащей  $d\Delta y_{\beta}(x) dx W / \Omega$  атомов (рис. 4). Выделившееся тепло  $\Delta g_{\delta(\alpha, \zeta)} d\Delta y_{\delta}(x) dx W / \Omega / dt$  пойдет

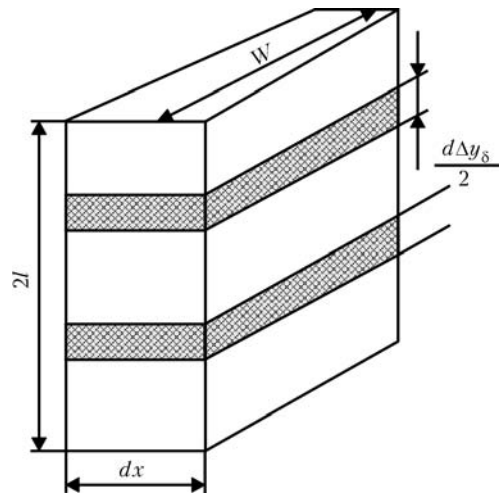


Рис. 4. Прослойка  $d\Delta y_{\delta}$ , из которой выделяется тепло за промежуток времени  $dt$

на нагрев прослойки  $dx$  по всей толщине  $2l$ . Таким образом, изменение температуры в сечении  $dx$  составит

$$q_{\delta}(x) = \frac{\Delta g_{\delta(\alpha, \zeta)} d\Delta y_{\delta}(x) dx W / \Omega / dt}{c_p \rho 2l dx W} = \frac{\Delta g_{\delta(\alpha, \zeta)} d\Delta y_{\delta}(x)}{2l c_p \rho \Omega dt}, \quad (2)$$

где  $c_p$  — удельная теплоемкость;  $\rho$  — плотность.

При стационарном режиме горения каждая точка фронта движется с постоянной скоростью  $v$  и характеризуется температурой  $T(x)$ , шириной образованной фазы  $\Delta y(x)$  между каждыми двумя слоями, тепловыделением на один атом за единицу времени  $q_{\delta}(x)$ . Очевидно, что диффузионные характеристики зависят от температуры, определяемой тепловыделением, которое в свою очередь зависит от эффективности диффузионного процесса. Таким образом, решением поставленной задачи будет нахождение самосогласованных профилей  $T(x)$ ,  $\Delta y(x)$  и  $q(x)$ . Для этого необходимо применить итерационную процедуру, условием остановки которой будет стабилизация указанных профилей.

Для построения самосогласованной модели, требующей численных расчетов, найдем профиль ширины образованной δ-фазы. Для этого запишем уравнение баланса вещества для движущейся межфазной границы  $y_{\alpha\delta}$  (компонент A / промежуточная фаза) и для движущейся межфазной границы  $y_{\delta\zeta}$  (промежуточная фаза / компонент B), используя приближение (1):

$$\begin{cases} (c_{\delta} - 0) \frac{dy_{\alpha\delta}}{dt} = - \frac{D_{\delta} \Delta c_{\delta}}{y_{\delta\zeta} - y_{\alpha\delta}}, \\ (1 - c_{\delta}) \frac{dy_{\alpha\delta}}{dt} = + \frac{D_{\delta} \Delta c_{\delta}}{y_{\delta\zeta} - y_{\alpha\delta}}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $c_{\delta}$  — средняя концентрация в δ-фазе;  $D_{\delta}$  — коэффициент диффузии в δ-фазе;  $\Delta c_{\delta}$  — интервал гомогенности δ-фазы.

После несложных математических преобразований получим:

$$\frac{d\Delta y_{\delta}^2(t, x)}{dt} = \frac{2}{c_{\delta}(1 - c_{\delta})} D_{\delta}^W, \quad (4)$$



где  $y_{\delta\zeta} - y_{\alpha\delta} = \Delta y_{\delta}(t, x)$ ;  $D_{\delta}^W = D_{\delta}\Delta c_{\delta}$  – диффузионная проницаемость фазы, которая зависит от температуры (функции времени и координаты) и является комбинацией диффузии  $D_{\delta}^*(A)$ ,  $D_{\delta}^*(B)$  меченых атомов  $A$ ,  $B$  и термодинамического стимула преобразования  $\Delta g_{\delta(\alpha,\zeta)}(T)$  [12]:

$$D_{\delta}^W(T(t, x)) = (c_{\delta} D_{\delta}^*(A) + (1 - c_{\delta}) D_{\delta}^*(B)) \times \Delta g_{\delta(\alpha,\zeta)}(T(t, x)) / k_B T(t, x), \quad (5)$$

где  $c_{\delta} D_{\delta}^*(A) + (1 - c_{\delta}) D_{\delta}^*(B) = D_{0\delta}^* \exp(-Q_{\delta}/k_B T(t, x))$ ,  $D_{0\delta}^*$ ,  $Q_{\delta}$  – соответственно предэкспоненциальный множитель и энергия активации диффузии;  $k_B$  – постоянная Больцмана.

При интегрировании выражения (4) необходимо учесть, что прослойка  $\Delta y_{\delta}(t, x)$  содержит слой  $\Delta y_0$  с диффузионной проницаемостью  $D_0^W$ , в котором реакция прошла еще до начала СВС:

$$\Delta y_{\delta}^2(t, x) - \Delta y_0^2(t, x) = \frac{2}{c_{\delta}(1 - c_{\delta})} \int_{-\infty}^t (D_{\delta}^W(T(t', x)) - D_0^W) dt', \quad (6)$$

где  $t$  – время смыкания прослоек новой  $\delta$ -фазы.

Перейдем к новым переменным  $\xi = x - vt'$ ,  $t' = \frac{x - \xi}{v}$ ,  $dt' = -\frac{d\xi}{v}$

так, чтобы  $\tilde{x} = x - vt$ ,  $\begin{cases} \tilde{x} < 0 & \text{— after front} \\ 0 < \tilde{x} & \text{— in front} \end{cases}$ . Тогда при  $\tilde{x} = 0$  прослойки смыкаются  $\Delta y_{\delta}(t, 0) = 2l$ , решение (6) будет иметь вид

$$\Delta y_{\delta}^2(\tilde{x}) = \Delta y_0^2 + \frac{2}{c_{\delta}(1 - c_{\delta})} \frac{1}{v} \int_{\tilde{x}}^{+\infty} (D_{\delta}^W(T(\xi)) - D_0^W) d\xi, \quad (7)$$

а скорость распространения стационарного фронта

$$v = \frac{1}{4l^2 - y_0^2} \frac{2}{c_{\delta}(1 - c_{\delta})} \int_0^{+\infty} D_{\delta}^W(T(\xi)) - D_0^W d\xi. \quad (8)$$

В уравнении теплопроводности перейдем к введенной переменной  $\tilde{x}$

$$-v \frac{\partial T}{\partial \tilde{x}} - a_{\delta}^2 \frac{\partial^2 T}{\partial \tilde{x}^2} = \begin{cases} 0, & \tilde{x} < 0, \Delta y(\tilde{x}) = 2l \text{ — after front} \\ q_{\delta}(\tilde{x}), & 0 < \tilde{x}, \Delta y_0 < \Delta y(\tilde{x}) < 2l \text{ — in front} \end{cases} \quad (9)$$

Подставим выражение (2) в формулу (9), предварительно заменив  $dt = d\tilde{x}/v$ , и получим уравнение, описывающее распространение тепла во фронте ( $0 < \tilde{x}$ ):

$$-v \frac{\partial T}{\partial \tilde{x}} - a_{\delta}^2 \frac{\partial^2 T}{\partial \tilde{x}^2} = \frac{\Delta g_{\delta(\alpha,\zeta)}(T(\tilde{x}))}{2lc_p\rho\Omega} v \frac{d\Delta y_{\delta}(\tilde{x})}{d\tilde{x}}. \quad (10)$$

Формальное решение уравнения (9) приводит к следующему интегральному уравнению:

$$T(\tilde{x}) = \begin{cases} T_0 + \frac{1}{v} \int_0^{\infty} q_{\delta(\alpha,\zeta)}(T(\xi)) d\xi, & \tilde{x} < 0 \\ T_0 + \frac{1}{v} \int_{\tilde{x}}^{\infty} q_{\delta(\alpha,\zeta)}(T(\xi)) d\xi + \frac{1}{v} \int_{\infty}^{\tilde{x}} q_{\delta(\alpha,\zeta)}(T(\xi)) \exp\left(\frac{v}{a_{\delta}^2}(\xi - \tilde{x})\right) d\xi, & 0 < \tilde{x} \end{cases}, \quad (11)$$

которое можно решить с помощью итерационной самосогласованной процедуры одновременного определения профиля изменения температуры (11) и скорости (8).

Чтобы избежать описанной итерационной процедуры, предложенную модель можно упростить, получив простые аналитические оценки максимальной температуры во фронте  $T_f$  и скорости прохождения фронта  $v$ . Это потребует использования еще одного допущения: при решении уравнения теплопроводности (но не диффузии!) пренебречь теплом, выделяющимся в результате образования новой фазы. Тогда в квазистационарном приближении  $\frac{\partial T}{\partial t} = -v \frac{\partial T}{\partial x}$  уравнение теплопроводности будет

иметь вид  $-v \frac{\partial T}{\partial x} - a_{\delta}^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$  с решением

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_0 \exp\left(-\frac{v}{a_{\delta}^2}x\right) \sim \exp\left(-\frac{x}{L}\right),$$

где ширина фронта

$$L = \frac{a_{\delta}^2}{v}. \quad (12)$$

За время  $\tau \sim \frac{L}{v} = \frac{a_{\delta}^2}{v^2}$  прохода фронта шириной  $L$

в результате реакционной диффузии  $\delta$ -фаза с равновесной концентрацией  $c_{\delta}$  должна сомкнуться:

$$\frac{2}{c_{\delta}(1 - c_{\delta})} \int_0^{\tau} D(T(t)) dt \approx (2l)^2 - (\Delta y_0)^2, \quad (13)$$

где  $D(T) = D_{0\delta}^* \exp\left(-\frac{Q_{\delta}}{k_B T}\right) \frac{\Delta g_P \delta(\alpha, \zeta)}{k_B T}$ .

В результате интегрирования уравнения (13) с использованием несложных, но громоздких математических преобразований получим выражение для скорости распространения стационарного фронта:

$$v = \sqrt{\frac{2}{c_{\delta}(1 - c_{\delta})} \frac{\alpha^2 D_0 \delta \Delta g_{\delta(\alpha,\zeta)}}{4l^2 - \Delta y_0^2} \frac{T_0 (k_B T_f + Q_{\delta})}{Q_{\delta}^2 (T_f - T_0)} \exp\left(-\frac{Q_{\delta}}{k_B T_f}\right)}, \quad (14)$$

где  $T_f$  – максимальная температура во фронте.

При оценке  $T_f$  используем формулу (10). Поскольку максимальная температура достигается за время  $t$  прохождения реакции по всей толщине эффективной прослойки  $2l - \Delta y_0$ , то изменение температуры равно

$$T_f - T_0 = \int_0^t q_{\delta}(x) dx = \frac{\Delta g_{\delta(\alpha,\zeta)}(2l - \Delta y_0)}{2lc_p\rho\Omega}. \quad (15)$$

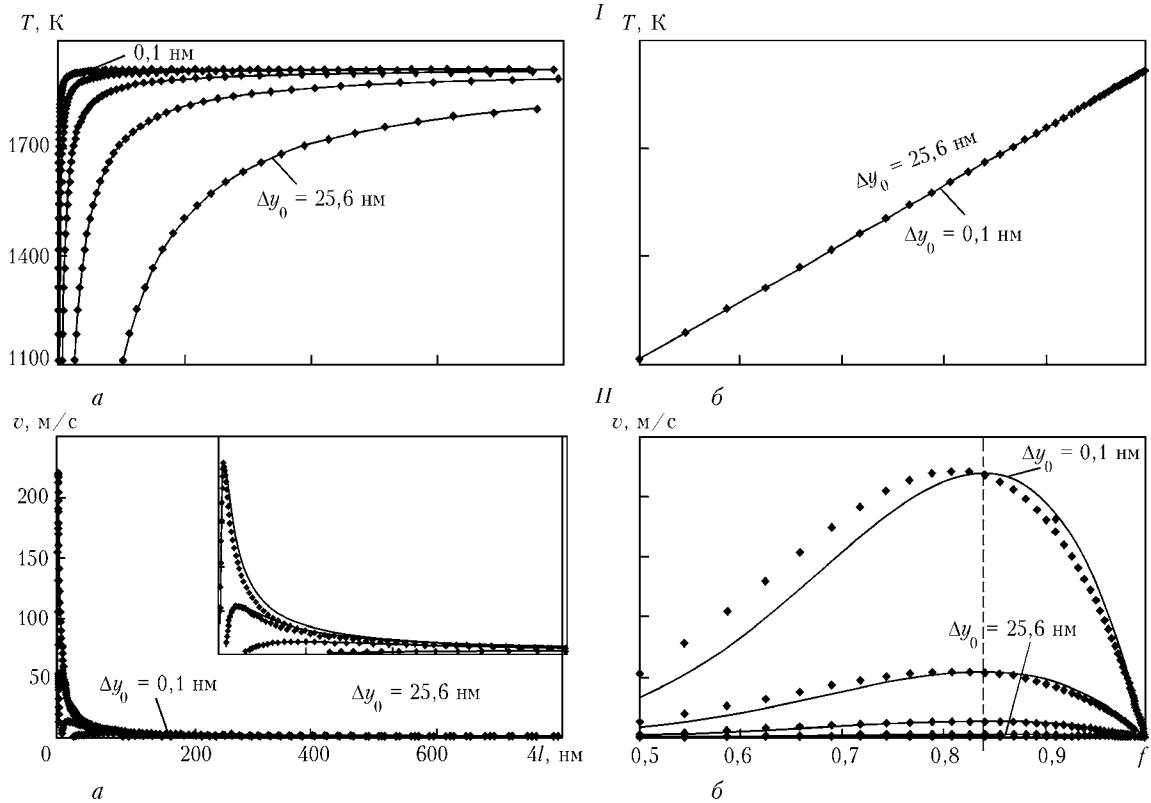


Рис. 5. Зависимости максимальной температуры во фронте  $T_f$  (I) и скорости фронта  $v$  (II) от периода мультислоя  $4l$  (a) и коэффициента эффективности прослойки  $f$  (б) при различных значениях ширины начальной фазы  $\Delta y_0$  в результате образования одной промежуточной фазы в ходе расчетов по самосогласованной модели (линии) и аналитической оценке (точки). Штриховая линия проходит через максимальные значения скорости при различных  $\Delta y_0$

Очевидно, чем больше толщина начальной прослойки  $\Delta y_0$ , тем ниже максимальная температура  $T_f$  во фронте. При  $\Delta y_0 = 0$  будет достигнута максимальная температура  $T_{\max} = T_0 + \frac{\Delta g_{\delta(\alpha, \zeta)}}{c_p \rho \Omega}$ .

В предложенной аналитической оценке не учитывается влияние тепловыделения на профиль температуры (нуль в правой части уравнения теплопроводности), т. е. эта модель не является самосогласованной.

Для количественных оценок предложенных моделей с одной промежуточной фазой использовали параметры, приведенные в работе [9]:  $c_{\delta} = 0,5$ ;  $D_{0\delta}^* = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $Q_{\delta} = 2,7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ;  $a_{\delta}^2 = 7,451 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $T_0 = 300 \text{ К}$ ; термодинамический стимул образования  $\delta$ -фазы  $\Delta g_{\delta(\alpha, \zeta)} = 7,36549 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$  определен из оценки формулы (15) при  $\Delta y_0 = 0$  и  $T_f = 1919 \text{ К}$ .

Для анализа результатов удобным является параметр  $f = (2l - \Delta y_0)/(2l)$ , определяющий долю прослойки, не прореагировавшей в ходе изготовления мультислоистой фольги, где возможно фазообразование в процессе СВС. То есть  $f$  показывает эффективность протекания реакции СВС (при  $f \cong 1$  температура фронта достигает максимального значения  $T_f = T_{\max}$ ) и может принимать значения от нуля (фазообразование прошло по всей толщине прослойки) до единицы (многослойная пленка сос-

тоит из чистых компонентов без промежуточных фаз). Поэтому введенный параметр  $f$  мы назвали коэффициентом эффективности прослойки. В компьютерных расчетах его значение находится в интервале  $0,5 \leq f < 1$ , поскольку мультислоистую фольгу с  $f < 0,5$  неэффективно использовать в процессах СВС.

Величина  $l$  (четверть периода мультислоя) варьировалась от  $\Delta y_0$  ( $f = 0,5$ , прореагировала половина прослойки) до 200 нм (максимальные значения при напылении), а толщина прослойки  $\Delta y_0$ , которая взаимодействовала до прохождения фронта горения, изменялась от 0,1 нм ( $f \cong 1$ , меньше межплоскостного расстояния) до 100 нм ( $f = 0,5$ , половина максимальной толщины прослойки при напылении). На графиках представлены результаты для  $\Delta y_0$ , принимающего значения 0,1; 0,4; 1,6; 6,4; 25,6 нм.

В ходе компьютерных расчетов фиксировали максимальную температуру во фронте (рис. 5, I); скорость фронта по формуле (8) (рис. 5, II). Результаты сравнивали с оценками упрощенной аналитической модели: для скорости фронта по формуле (14), для максимальной температуры во фронте по формуле (15). Качественно профили скорости фронта совпали. Для количественного совпадения оказалось достаточно ввести подгоночный множитель  $p$  в формулах (12) и (14):

\*Звездочкой помечены формулы (12), (14), (15), уточненные с применением подгоночного множителя.

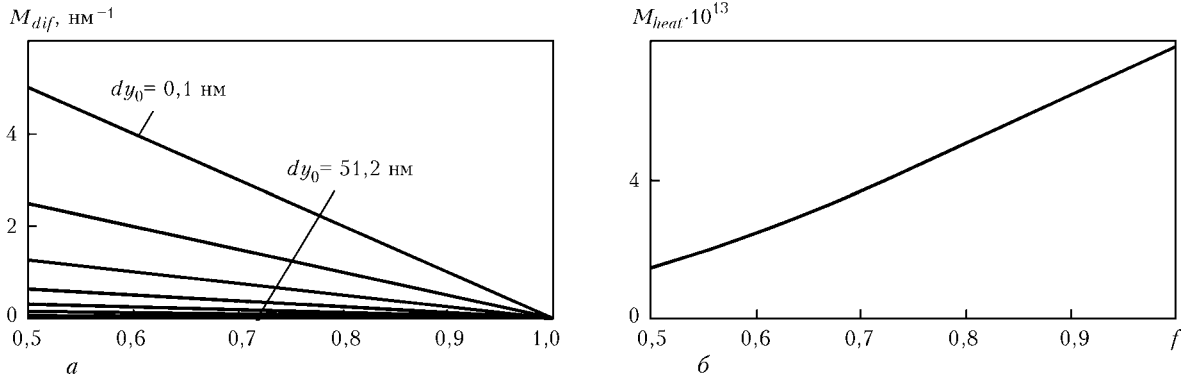


Рис. 6. Конкурирующие факторы  $M_{dif}$  (а) и  $M_{heat}$  (б), суперпозиция которых определяет немонотонный характер зависимости скорости фронта от коэффициента эффективности прослойки  $f$  ( $Q = 1,35 \cdot 10^{-19}$  Дж)

$$L = p \frac{a^2}{v}, \quad (12^*)$$

вить  $\frac{1}{4l^2 - \Delta y_0^2}$  как  $\frac{1}{4l^2 f(2-f)}$ , то скорость фронта можно описать функцией от двух переменных:

$$v = \sqrt{p \frac{2}{c_8(1-c_8)} \frac{\alpha^2 D_0 \delta \Delta g_{\delta(\alpha, \zeta)} T_0 (k_B T_f + Q_\delta)}{4l^2 - \Delta y_0^2} \frac{T_0 (k_B T_f + Q_\delta)}{Q_\delta (T_f - T_0)} \exp\left(-\frac{Q_\delta}{k_B T_f}\right)}, \quad (14^*)$$

$$v(l, f) = \frac{1}{l} \sqrt{const \frac{1}{f(2-f)} \frac{(k_B T_f(f) + Q_\delta)}{(T_f(f) - T_0)} \exp\left(-\frac{Q_\delta}{k_B T_f(f)}\right)}, \quad (16)$$

где  $T_f = T_0 + (T_{max} - T_0)f$ . (15^\*)

т. е. скорость определяется двумя такими конкурирующими факторами (без учета постоянных величин):

На рис. 5, II точками обозначены профили скорости фронта при оптимальном подгоночном множителе  $p = 4,04$  (определен в максимальном значении зависимости  $v(4l)$  при  $\Delta y_0 = 0,1$  нм).

диффузионным, обратно пропорциональным периоду мультислоя  $M_{dif}(l) = 1/l$  и связанным с параболическим ростом новой фазы (чем больше  $l$ , тем длиннее диффузионный путь); убывающим с увеличением  $f$  (рис. 6, а);

Поскольку результаты предложенных моделей качественно совпадают, то для анализа полученных зависимостей используем аналитические выражения (14) и (15). Из формулы (15) видно, что максимальная температура во фронте зависит от термодинамического стимула образования новой фазы.

тепловым, зависящим от температуры фронта как функции от коэффициента эффективности

Зависимость температуры от периода мультислоя  $4l$  и толщины начальной прослойки новой фазы  $\Delta y_0$  определяется коэффициентом эффективности прослойки  $f$  и имеет линейный характер (рис. 5, I, б). При фиксированном  $\Delta y_0$  выход на асимптотическое значение температуры во фронте происходит, когда период мультислоя становится достаточным для прогрева с учетом  $\Delta y_0$ : чем больше начальная прослойка, тем больше период мультислоя  $4l$ , при котором достигается максимальная температура во фронте (рис. 5, I, а).

$$M_{heat}(l, f) = \sqrt{\frac{1}{f(2-f)} \frac{(k_B T_f(f) + Q_\delta)}{(T_f(f) - T_0)} \exp\left(-\frac{Q_\delta}{k_B T_f(f)}\right)}, \quad \text{и}$$

возрастающим с увеличением  $f$  (рис. 6, б).

Немонотонный характер зависимости скорости от периода мультислоя коррелирует не только с аналитическими оценками для твердо- [9] и газофазного [13] горения, но и с экспериментальными результатами для системы TiAl [14]. В области малых значений  $l$  коэффициент эффективности стремится к значению 0,5, что означает малый прогрев мультислоев, причиной которого авторы работы [14] считают «возрастание удельной поверхности межслоевых границ на единицу объема».

При этом максимальная скорость достигается при одном и том же значении  $f$ , независимо от периода мультислоистой структуры (рис. 6, II, б). В свою очередь, положение максимума определяется энергией активации диффузии для данной фазы: при  $Q_\delta = 2,7 \cdot 10^{-19}$  Дж максимуму скорости соответствует значение  $f = 0,85$ ; при  $Q_\delta = 1,35 \cdot 10^{-19}$  Дж максимум смещается в  $f = 0,675$ .

Проанализируем причину немонотонной зависимости скорости фронта от периода мультислоя с математической точки зрения. Если в выражении (14^\*) подставить температуру фронта как функцию от коэффициента эффективности (15^\*) и предста-

Падение скорости фронта при  $f$ , близком к 0,5, можно объяснить преобладающим влиянием теплового фактора  $M_{heat}$ , который убывает значительно резче, чем возрастает диффузионный множитель  $M_{dif}$ , т. е. при большом периоде мультислоев увеличивается диффузионный путь атомов, удлиняя время разогрева и, соответственно, делая его не настолько эффективным.

Кроме того, из формулы (16) очевидно, что произведение скорости и периода мультислоя определяется коэффициентом эффективности  $l(f)v(f) = Func(f)$ . Для проверки этого соотношения, полученного из простой аналитической модели, построили зависимости  $l(f)v(f)$  при изменении  $\Delta y_0$  и фиксированных  $l$  для результатов по самосогласованной модели (рис. 7). Кривые совпадают (незначительные расхождения вызваны погрешностями ли-

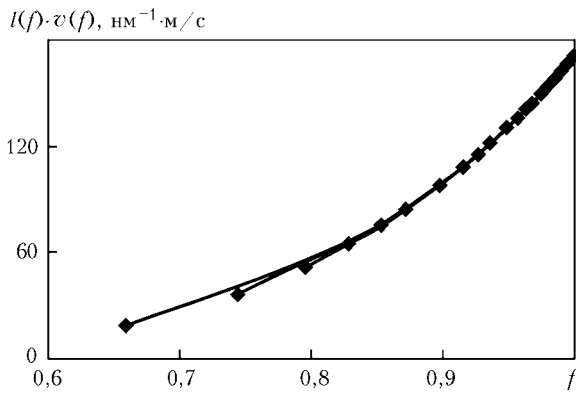


Рис. 7. Зависимости произведения  $l(f)v(f)$  от периода коэффициента эффективности прослойки  $f$  при изменении значений ширины начальной фазы  $\Delta y_0$  и фиксированных значениях  $l$  (50, 75, 100, 125, 150, 175 нм) в результате расчетов по самосогласованной модели

нейной интерполяции при определении скорости для фиксированного  $l$  из зависимостей  $v(l)$  при фиксированном  $\Delta y_0$ , рис. 6, а). Полученный результат еще раз подтверждает адекватность простой оценки.

Поскольку мультислойные фольги являются неравновесными объектами, то нет гарантии, что диффузионные и термодинамические параметры нашей модели можно брать из таблиц физических величин. Это касается прежде всего стимулов превращения и энергии активации диффузии. Мы предлагаем трактовать их как подгоночные параметры в уравнении (14\*). Заметим, что производная  $\ln(l(f)v(f))$  по  $f$  (с учетом (15\*)) зависит только от одного параметра  $Q_\delta$ :

$$\frac{d \ln(l(f)v(f))}{df} = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1}{f^2(2-f)} \frac{Q_\delta}{(T_{\max} - T_0)} \right) - \frac{Q_\delta}{k_B T(f)}$$

Сравнение с экспериментальной кривой позволяет произвести однопараметрическую подгонку величины  $Q_\delta$ . Подогнанное значение  $Q_\delta$  можно использовать для нахождения второго свободного параметра  $D_{0\delta} \Delta g_\delta(\alpha, \zeta)$ .

### Выводы

1. Использован феноменологический подход для описания стационарного режима процесса СВС, контролируемого реакционной диффузией. Предложенные модели могут быть использованы для оценки влияния фазообразования на параметры фронта горения.

2. Сравнение результатов, полученных из простой аналитической оценки, с результатами численных расчетов по более сложной самосогласованной схеме позволяет подобрать подгоночный параметр. Его использование в формуле (14\*) делает возможным простую для расчетов оценку скорости фронта горения.

3. Обнаружено самоподобие в поведении мультислойной системы при фиксированном значении предложенного параметра эффективности  $f$ .

4. Полученные в рамках простых феноменологических моделей скейлинговые зависимости мож-

но использовать для оценки диффузионных и термодинамических параметров системы, а также для подгонки (калибровки) компьютерных расчетов температуры и скорости фронта горения к экспериментальным данным.

5. Откорректированную модель, адекватно описывающую реальные эксперименты СВС в тонких пленках, можно использовать для прогнозирования протекания реакций СВС в широком интервале характеристик многослойных фольг (толщин и периода мультислоя, концентрационного состава, дефектности и т. д.). Это позволит оптимизировать необходимые параметры протекания реакции СВС в тонких фольгах, не прибегая к большому количеству экспериментов.

*Работа поддержана Министерством образования и науки Украины, Государственным фондом фундаментальных исследований Украины, целевой комплексной программой НАН Украины «Наносистемы. Нанотехнологии. Наноматериалы» (проект № 91/09-Н).*

1. Мержанов А. Г. Твердопламенное горение. — Черноголовка: ИСМАН, 2000. — 224 с.
2. Диффузионная сварка микродисперсного композита Mg + 27% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с применением нанослойной фольги Ni/Al / А. Я. Ищенко, Ф. В. Фальченко, А. И. Устинов и др. // Автомат. сварка. — 2007. — № 7. — С. 5–9.
3. Diffusion welding of gamma-TiAl alloys through nano-layered foil of Ti/Al system / A. I. Ustinov, Yu. V. Falchenko, A. Ya. Ishchenko et al. // Intermetallics. — 2008. — V.16. — P. 1043–1045.
4. Шишкин А. Е., Роговченко Д. С., Устинов А. И. Определение мощности теплового потока при протекании реакции СВС в микрослойной фольге // Металлофизика и новейшие технологии. — 2009. — 31, № 9. — С. 1179–1188.
5. Лариков Л. Н., Гейченко В. В., Фальченко В. М. Диффузия в упорядоченных сплавах. — Киев: Наук. думка, 1975. — 214 с.
6. Colgan E. G. A review of thin-film aluminide formation // Mater. Sci. Rep. — 1990 — V. 5. — P. 1–44.
7. Ma E., Nicolet M. A., Nathan M. NiAl<sub>3</sub> formation in Al/Ni thin-film bilayers with and without contamination // J. Appl. Phys. — 1989. — V. 65. — P. 2703–2712.
8. Effect of overall composition on thermally induced solid-state transformation in thick EB-PVD Al/Ni / A. Ustinov, L. Olikhovska, T. Melnichenko, A. Shyshkin // Sur. and Coat. Technologies. — 2008. — V. 202. — P. 3832–3838.
9. Modeling and characterizing the propagation velocity of exothermic reactions in multilayer foils / B. Mann, A. J. Gaven, M. E. Reiss et al. // J. Appl. Phys. — 1997. — V. 82. — P. 1178–1188.
10. Gusak M., Yarmolenko M. V. A simple way of describing the diffusion phase growth in cylindrical and spherical samples // J. of Applied Physics. — 1993. — V. 73. — P. 4881–4884.
11. Модели твердофазных реакций / А. М. Гусак, А. О. Богатырев, Т. В. Запорожец и др. — Черкассы: ЧНУ, 2004. — 314 с.
12. Gusak A. M., Tu K. N. Interaction between the Kirkendall effect and the inverse Kirkendall effect in nanoscale particles // Acta Mat. — 2009. — V. 57. — P. 3367–3373.
13. Струнин В. А., Манелис Г. Б. Влияние газофазной реакции на характеристики горения слоевой системы «сэндвич» // Физика горения и взрыва. — 2004. — 40, № 3. — С. 22–27.
14. Безгазовое горение многослойных биметаллических нанопленок Ti/Al / А. С. Рогачев, А. Э. Григорян, Е. В. Илларионова и др. // Там же. — 2004. — 40, № 2. — С. 45–51.

Черкас. нац. ун-т им. Богдана Хмельницкого  
Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины

Поступила в редакцию 02.11.2009



УДК 669.786:621.365.2

## О ВЛИЯНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СОДЕРЖАНИЕ АЗОТА В СТАЛИ, ВЫПЛАВЛЯЕМОЙ В СВЕРХМОЩНОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ

Е. Л. Корзун, А. Г. Пономаренко,  
А. В. Кодак, Е. М. Юденков

Рассмотрено влияние углеродистого порошка, применяемого для вспенивания шлака при выплавке стали в сверхмощных дуговых печах, на уровень содержания азота в металле. Получена статистическая зависимость изменения содержания азота в жидком металле от интенсивности ввода углеродистых материалов в период доводки. Отмечена двоякая роль вводимого углерода. Обсуждены условия получения сталей с особо низким и регламентированным содержанием азота.

The effect of application of carbon powder for slag sponging in steel melting in a superpower furnace on the level of nitrogen content in metal is considered. The statistical dependence of change of nitrogen content in molten metal on intensity of adding of carbon materials in the period of finishing is obtained. The double role of added carbon is outlined. The conditions of producing steels with ultra-low and regulated content of nitrogen are discussed.

**Ключевые слова:** азот; эффективность удаления; градиент окисленности шлака; эффект накачки; сверхмощная дуговая печь; вспенивание шлака

Повышенное внимание к азоту связано с его существенным влиянием на служебные свойства конечных изделий, постоянно растущими требованиями к качеству металла и развитием сталеплавильной технологии. Для многих видов стальной продукции сертифицируется максимально допустимое содержание азота на уровне ниже 50 ppm, а для отдельных видов — ниже 20 ppm [1, 2]. Сложное и во многом своеобразное поведение азота в условиях сталеплавильного процесса было предметом многочисленных исследований как общетеоретических [3–5], так и технологических, относящихся к конкретным условиям плавки [6–9].

Данная статья представляет собой попытку обобщения публикаций, а также некоторых наблюдений авторов, относящихся к динамике азота при выплавке стали в дуговой печи сверхвысокой удельной мощности.

Своеобразие поведения азота при плавке в открытых печах проявляется прежде всего в том, что его содержание в металле всегда остается существенно (примерно на порядок) ниже равновесного с печной атмосферой и, главное, продолжает моно-

тонно снижаться по ходу плавки [4, 6–9]. Это означает, что перенос азота происходит в сторону градиента (возрастания) его химического потенциала, что, на первый взгляд, противоречит законам термодинамики и диффузионной кинетики.

В руководствах по кинетике металлургических процессов рассмотрение взаимодействия потоков обычно ограничивается кратким указанием на термодиффузию, термоЭДС и эффект Соре. Поэтому единственным объяснением этого явления в литературе остается вынос азота пузырьками CO, образующимися при окислении углерода.

Однако обширный литературный материал, относящийся к поведению газов в открытых печах, работающих по классической технологии (от мартенов до сверхмощных ДСП), свидетельствует о том, что полное прекращение окисления углерода в восстановительный период плавки не отражается заметным образом на процессе удаления азота [6, 10]. Его содержание продолжает снижаться и после ввода раскислителей. К тому же и простой расчет, основанный на совместном решении следующих двух уравнений:

закона Сивертса для растворимости азота в металле

$$[N] = K_N - P_{N_2}^{1/2} \quad (1)$$

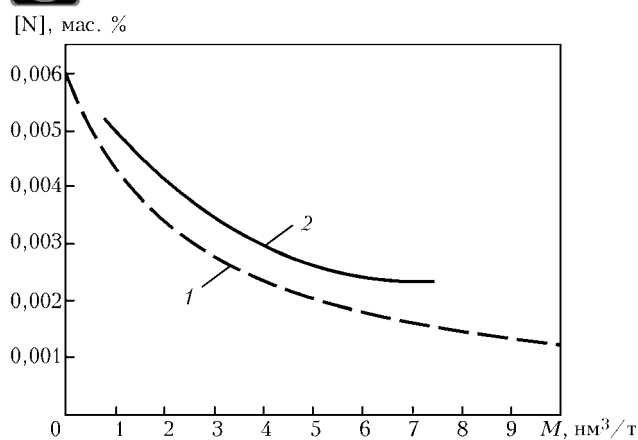


Рис. 1. Сравнение результатов расчета количества газа-носителя для удаления азота из расплава стали с экспериментальными данными [12] при исходной концентрации азота 0,006 мас. %: 1 — расчет; 2 — эксперимент;  $M$  — расход несущего газа

и давления газа в пузырьке

$$P_b = P_{CO} + P_{N_2} \quad (2)$$

где  $[N]$  — содержание азота в металле;  $K_N$  — константа равновесия реакции растворения азота в металле;  $P_{N_2}$  — парциальное давление азота в пузырьке;  $P_{CO}$  — давление монооксида углерода в пузырьке (формула В. Геллера [11], расчеты В. И. Явойского [7] и др.), показывает, что «пузырьковый» механизм удаления азота эффективен лишь при относительно высоком его содержании в стали даже при полном насыщении всплывающих пузырьков азотом.

Если учесть кинетические запаздывания, быстро нарастающие с понижением концентрации азота, действительная эффективность этого механизма оказывается еще ниже. Практика внепечной дегазации и экспериментальные исследования [12] показали, что вынос азота пузырьками CO или другого газа практически прекращается при достижении уровня примерно 0,0024 мас. % даже при продувке с расходом 6...7 м³/т (рис. 1). Тем не менее в условиях мартеновского процесса содержание азота к концу плавки зачастую опускается ниже 0,002 мас. % [4, 6].

Можно привести множество примеров, указывающих на существование потока азота, направленного в сторону градиента его химического потенциала, и отсутствие связи между этим явлением и углеродным кипением металла, что особенно четко проявляется на сплавах с высокой растворимостью азота, в частности при выплавке низкоуглеродистого феррохрома (около 80 % Cr, 0,06 % C, 1 % Si) в открытых дуговых рудотермических печах.

Процесс плавки в указанных печах циклический в общих чертах сходен по периодам с плавкой в дуговой сталеплавильной печи (ДСП): завалка—расплавление—доводка—выпуск; шихта—руда и известь (примерно в равных количествах), восстановитель—кремний (силикохром).

В наших исследованиях печной свод отсутствовал. Растворимость азота в указанном выше сплаве

составляла около 3 % (почти на два порядка выше, чем в железе), что позволило более детально исследовать динамику его поведения в широком диапазоне концентраций.

Согласно данным работы [13], азот в пробах металла, взятых из печи к концу плавки, обычно составлял тысячные и даже десятитысячные доли процента, несмотря на высокое сродство хрома к азоту и тот факт, что печная атмосфера состоит преимущественно из азота.

В экспериментах по разработке технологии получения литого азотированного феррохрома на подину печи (перед завалкой) загружались брикеты вакуумтермического азотированного феррохрома (примерно 7 мас. % азота) для получения в готовом сплаве содержания азота, близкого к насыщению. Однако и в этом случае практически весь дополнительно введенный азот к концу плавки оказывался выброшенным в атмосферу. Деазотация металла и ее независимость от процесса окисления углерода при электрошлаковом переплаве сталей и сплавов показаны в работах [14, 15].

Вместе с тем в определенных условиях зафиксировано активное поступление азота в металл из атмосферы печи во время плавки. При плазменно-дуговом переплаве происходит интенсивное азотирование оголенного металла в области плазменного «пятна» и «азотное кипение» на периферии, в результате чего содержание азота может снижаться до равновесного.

Подобное явление зафиксировано в работе [16] при исследовании динамики содержания азота в металле в начальный период плавки в «кислой» ДСП. В процессе прохождения электродами «колодцев» в твердой шихте, когда оголенная пленка стекающего жидкого металла в области дуг непосредственно контактирует с атмосферой, содержание азота возрастает почти на порядок, а к концу плавки снижается до обычного уровня.

«Гольый», т. е. не покрытый шлаком металл, как в лабораторных, так и промышленных условиях на воздухе или в атмосфере технического азота может достаточно быстро насыщаться до равновесия. Когда же металл оказывается отделенным от печной атмосферы слоем шлака, и в газовой фазе присутствует даже небольшое количество кислорода, ситуация коренным образом меняется — азот начинает активно уходить в атмосферу. Во время лабораторных плавок феррохрома при этом отчетливо видно «азотное кипение» шлака.

Газовая фаза открытых печей всегда содержит кислород, поэтому поверхностный слой шлака более окислен, чем слой, контактирующий с металлом. Перепад химических потенциалов кислорода вызывает его диффузионный поток в объеме шлака, направленный к металлу. Этот поток, в частности, питает сталеплавильную ванну кислородом в период «чистого кипения» и радикальным образом отражается на всей картине материальных потоков в шлаке, вплоть до обращения некоторых из них в сторону





градиента (возрастания) их химического потенциала. Такие процессы иногда называют «накачкой».

Полный перепад окисленности в слое шлака легко оценить, выразив его через равновесное парциальное давление кислорода  $P_{O_2}$  на верхней и нижней границах. Для открытых печей это составляет примерно 10 кПа (воздух) и около  $1 \cdot 10^{-3}$  Па (предельно окисленное железо при 1600 °С). Отсюда, пользуясь методикой расчета, подробно описанной в работах [17–19], можно вычислить термодинамический предел возможной деазотации и сделать целый ряд количественных оценок, касающихся других потоков. На этой основе разработан и реализован на практике целый ряд технологических приемов управления газонасыщенностью металла.

На большинстве современных сверхмощных ДСП при выплавке стали используется интенсивное вдувание углеродистого порошка на заключительном отрезке плавки (10... 15 мин) с целью поддержания режима «затопленных дуг» и довосстановления железа из шлака. Происходящее при этом вскипание шлака должно, с одной стороны, усилить массообменные процессы в его объеме, включая и вынос азота, а с другой, раскисление поверхности углеродом снижает перепад окисленности, что должно оказывать прямо противоположное влияние на итоговое содержание азота.

В работах [19, 20] отмечено повышение среднего уровня азота в заключительный период плавки с выбросами на отдельных плавках до 0,015... 0,020 %. Отмена операции раскисления шлака коксом полностью устраняет указанные выбросы и стабилизирует содержание азота в конце плавки на уровне примерно 0,005 мас. % [19]. Поскольку равновесное с твердым углеродом давление кислорода при 1600 °С составляет около  $1 \cdot 10^{-6}$  Па, слишком плотное покрытие углеродистым порошком поверхности шлака может не только уменьшить градиент окисленности в шлаковом слое, но и изменить его направление.

Отдача кокса на поверхность шлака (так называемое диффузионное раскисление) широко практиковалась в мартеновских и дуговых печах, работающих по классической технологии, однако какой-либо связи этой операции с содержанием азота в литературе не зафиксировано. Экспериментальное исследование [18] показало, что содержание азота в металле при раскислении поверхности шлака уг-

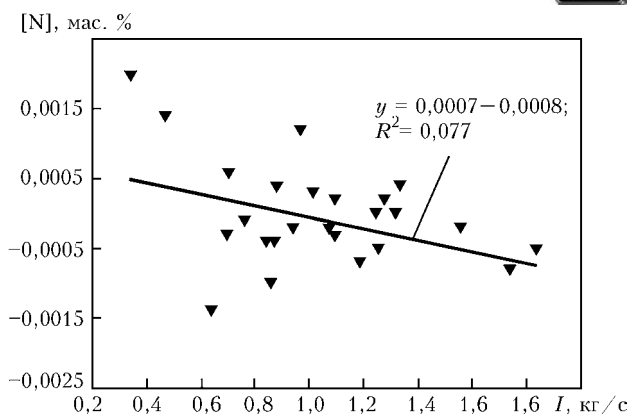


Рис. 2. Влияние интенсивности подачи  $I$  углеродистого порошка для вспенивания шлака в окислительный период на изменение содержания азота в металле

леродистыми материалами в сильной степени зависит от условий проведения операции (вводимого материала, его дисперсности и др.).

Поэтому определенный интерес представляло уточнение данного вопроса применительно к условиям выплавки стали в сверхмощной ДСП. Исследования проводились на базе электросталеплавильного цеха Донецкого электрометаллургического завода (ДЭМЗ) на печи ДСП-2. Номинальная вместимость печи 120 т, номинальная мощность трансформатора — 87 МВ·А. Содержание азота в металле на выпуске из печи было довольно стабильным и находилось в пределах от 0,004 до 0,009 при среднем содержании 0,0063 мас. %.

Методика проведения экспериментов состояла в следующем. По ходу плавки в дуговой сталеплавильной печи первую пробу на содержание азота отбирали одновременно с первой пробой металла по расплавлению последней подвалки, вторую пробу — непосредственно перед выпуском металла из печи. Анализ проб металла на содержание азота проводили по стандартным методикам восстановительного плавления в потоке газа-носителя на газоанализаторе ТС-300 фирмы «ЛЕСО». Относительная погрешность определения содержания азота составляла 0,5 %.

Результаты определения содержания азота в металле анализировали совместно с паспортами плавов и данными химического состава металла, пробы на который отбирали одновременно с пробами ме-

**Результаты корреляционного анализа влияния интенсивности подачи углеродистого порошка на изменение содержания азота в металле**

Коэффициент регрессии в уравнении $y = a + bx$	Значение коэффициента регрессии	Стандартная ошибка коэффициента регрессии	Критерий Стьюдента
A	0,000744	0,000508	1,4648
B	- 0,000814	0,000464	- 1,7532

Примечания. 1. Здесь  $x$  — интенсивность ввода порошка углерода, кг/с. 2. Количество наблюдений — 26. 3. Коэффициент корреляции  $R = -0,337$ ; коэффициент детерминации  $R^2 = 0,114$ ; уточненный коэффициент детерминации  $R^2 = 0,077$ ; значение  $F$ -критерия  $F(1,24) = 3,0736$ ; уровень значимости гипотезы  $p < 0,09234$ .



талла на азот. Всего отслеживали содержание азота на 26 плавках.

Анализ влияния скорости подачи углеродистого порошка для вспенивания шлака в период доводки на изменение содержания азота в металле за время между отборами проб показал наличие слабой связи между этими параметрами (рис. 2, таблица). Несмотря на низкое значение коэффициента детерминации влияние интенсивности ввода порошка углерода на изменение содержания азота в металле ( $R^2 = 0,077$ ), коэффициентов регрессионной зависимости (рис. 2) является значимым (таблица) с уровнем достоверности 90 %, а зависимость — обратно слабой ( $-0,5 < R = -0,337 < 0$ ).

Таким образом, в условиях режимов работы ДСП-2 ДЭМЗ с увеличением интенсивности подачи углеродистого порошка для вспенивания шлака в процессе доводки металла в ДСП содержание азота в металле снижается.

## Выводы

1. Показано, что ввод углеродистого порошка при вспенивании шлака имеет противоречивое влияние на изменение содержания азота в металле. С одной стороны, окисление углеродистых частиц в шлаке вызывает интенсивное перемешивание последнего и усиление вследствие этого эффекта «накачки», что ведет к снижению содержания азота в металле. С другой, чрезмерная подача углерода на поверхность шлака способствует резкому возрастанию разброса значений конечного содержания азота в металле при увеличении его среднего уровня [19].

2. Все сталеплавильные процессы с большой длительностью выдержки расплавленного металла под жидким шлаком (мартеновская плавка, выплавка стали из окатышей в дуговой печи при их непрерывном вводе в жидкую ванну) характеризуются низким содержанием азота в металле в конце плавки, что является следствием естественного выноса азота из металла за счет проявления эффекта «накачки».

3. Определено, что концентрация азота в металле в конце плавки не зависит от его содержания в исходных материалах, используемых для выплавки.

4. Для контроля содержания азота в сталеплавильных процессах необходимо учитывать взаимодействие потоков компонентов в системе газ—шлак—металл и прежде всего влияние потока кислорода на потоки остальных компонентов системы.

1. Zhang L., Thomas B. G. State-of-the-Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness // ISIJ International. — 2003. — 43, № 3. — P. 271–291.
2. The Production of Steels Applying 100 % DRI for Nitrogen Removal, the Experience of ArcelorMittal Lazaro Cardenas Flat Carbon / R. Lule, F. Lopez, J. Espinoza et al. // AISTech 2009 Proc. — 2009. — V. I. — P. 489–498.
3. Пельке Р. Д., Эллиотт Дж. Ф. Растворимость азота в жидких расплавах на основе железа // Пробл. современ. металлургии. — 1960. — № 6. — С. 3–28.
4. Морозов А. Н. Водород и азот в стали. — М.: Металлургия, 1968. — 284 с.
5. Растворимость азота в жидком железе / А. Г. Свяжин, Г. М. Чурсин, А. Ф. Вишкарев, В. И. Явойский // Изв. АН СССР. Металлы. — 1974. — № 5. — С. 24–35.
6. Явойский В. И. Газы в ваннах сталеплавильных печей. — М.: Металлургиздат, 1952. — 246 с.
7. Лузгин В. П., Явойский В. И. Газы в стали и качество металла. — М.: Металлургия, 1983. — 232 с.
8. Янке Д. Изменение содержания азота при производстве черных металлов. — Черные металлы. — 1992. — № 2. — С. 3–11.
9. Debra W., Siwka J., Nowosielski Cz. Controlling of the Nitrogen content during EAF — Technology and continuous casting of steel // Archives of Metallurgy and Materials. — 2008. — 53, issue 2. — P. 523–529.
10. Крамаров А. Д. Производство стали в электропечах. Изд. 2-е, перераб. — М.: Металлургия, 1964. — 440 с.
11. Кнютель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Часть 1. Термодинамические и кинетические особенности / Пер. с нем. Г. Н. Еланского. — М.: Металлургия, 1973. — 312 с.
12. Кнютель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Часть 2. Основы и технология ковшовой металлургии / Пер. с нем. Г. Н. Еланского. — М.: Металлургия, 1984. — 414 с.
13. Безобразов С. В. Теоретические основы и технология производства высококачественного феррохрома: Дис. ... д-ра техн. наук. — М., 1984. — 263 с.
14. Клюев М. М., Волков С. Е. Электрошлаковый переплав. — М.: Металлургия, 1984. — 208 с.
15. Латаш Ю. В., Медовар Б. И. Электрошлаковый переплав. — М.: Металлургия, 1970. — 240 с.
16. Pilliod C. F. Variables Affecting the Nitrogen Content of Carbon and Low-Alloy Acid Electric Arc Furnace Steels // Transactions of the American Foundrymen's Society. — 1992. — 100, № 8. — P. 23–25.
17. Пономаренко А. Г., Козлов Ю. Е. О некоторых особенностях массопереноса в оксидных фазах // Известия вуз. Черная металлургия. — 1975. — № 5. — С. 20–25.
18. Кодак А. В. Удаление водорода из стали в процессе электрошлакового переплава: Дис. ... канд. техн. наук. — Донецк, 1985. — 141 с.
19. Снижение содержания азота при выплавке стали в сверхмощной ДСП / Е. Л. Корзун, А. Г. Пономаренко, А. В. Гальченко и др. // Электрометаллургия. — 2001. — № 11. — С. 3–8.
20. Molinero J., Larauogoitia J. J., Bilbao E. New technologies for low nitrogen EAF steelmaking // 6th Eur. Elec. Steelmak. Conf. (Dusseldorf, June 13–15, 1999). — Dusseldorf, 1999. — P. 51–57.

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

Поступила 08.12.2009



УДК 669.295

## ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ПОДАЧА ПОРЦИЙ МАГНИЯ ПРИ МАГНИЙТЕРМИЧЕСКОМ ВОССТАНОВЛЕНИИ $TiCl_4$

Д. А. Листопад, И. Ф. Червоный

Изложены результаты экспериментальных исследований процесса восстановления тетрахлорида титана в реакторе при порционно-периодической подаче магния под слой реакционной массы. Установлено, что при таком оформлении процесса возрастает его скорость в начальный период вследствие интенсификации газофазных реакций, сокращается продолжительность высокотемпературной выдержки и повышается эффективность вакуумной сепарации получаемого экспериментального блока реакционной массы.

Results of experimental investigations of process of reduction of titanium tetrachloride in reactor at portion-periodic adding of magnesium under the layer of reaction mass are described. It was found that during this process its rate of reduction is growing at the initial period due to intensification of gas-phase reactions, the duration of high-temperature holding is decreased and effectiveness of vacuum separation of produced experimental block of reaction mass is increased.

**Ключевые слова:** порционная подача магния; способ Кроля; титановая губка; аппарат; восстановление; сепарация

Титан характеризуется ценным сочетанием высоких значений механических свойств и сравнительно небольшой плотностью ( $4,5 \text{ г/см}^3$ ). Изделия из титана отличаются термостойкостью и особо высокой удельной прочностью при значениях температуры до  $600^\circ\text{C}$ , по сравнению с основными марками стали и другими металлами конструкционного назначения, высокой удельной жаропрочностью, биосовместимостью и регламентированным управлением структурой и свойствами [1–3]. Это преимущество титана значительно усиливается у его сплавов, удельная прочность которых может быть увеличена в 1,5... 2,0 раза и сохраняется при повышенной температуре, тогда как многие другие конструкционные материалы в значительной степени разупрочняются [4, 5].

В настоящее время мировые мощности по производству губчатого титана составляют 181,9 тыс. т/год [6]. Основные производители губчатого титана и их доля в общемировых производственных мощностях по состоянию на 2009 г. представлены на рис. 1.

В последнее время титан используется в химической промышленности, медицине, при изготовлении спортивных и различных потребительских товаров, в электронике, архитектуре, автомобилестроении, авиации и изделиях космичес-

кого назначения. В черной металлургии титан применяют как легирующий элемент стали для уменьшения размера зерна и в качестве раскислителя, для снижения содержания углерода в нержавеющей стали, а также во многих других отраслях и направлениях.

Потребление титана в мире показано на рис. 2 [7].

В настоящее время промышленное производство титановой губки в основном реализовано при использовании магнийтермического восстановления тетрахлорида титана (способ Кроля). Несмотря на попытки создания других технологий [8] (FFC-Cam-

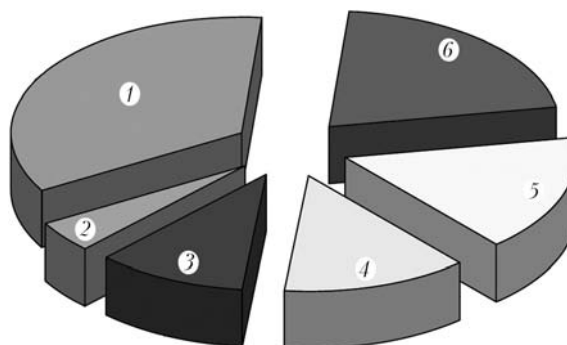


Рис. 1. Основные мировые производители губчатого титана и их доля в общемировых производственных мощностях в 2009 г.: 1 – 34 % Китай 67 тыс. т; 2 – 4 % Украина (ЗТМК) 8,5 тыс. т; 3 – 11 % США (Alta, ATI and Allvac, Timet) 20,4 тыс. т; 4 – 13 % Казахстан (УКТМК) 25 тыс. т; 5 – 17 % Россия (ВСМПО-АВИСМА) 32 тыс. т; 6 – 21 % Япония (Sumitomo, Toho and Yawata) 40 тыс. т

А, тыс. т

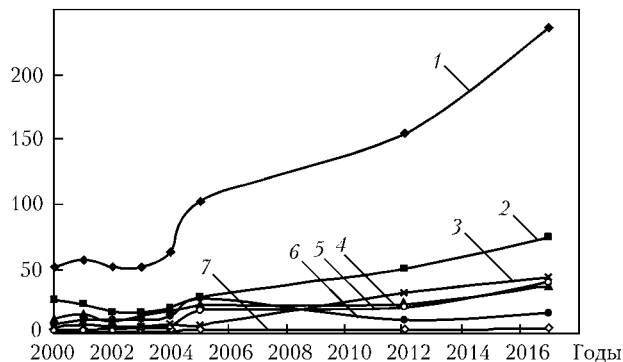


Рис. 2. Динамика мирового потребления А титана: 1 — всего; 2 — США; 3 — ЕС; 4 — Китай; 5 — Япония; 6 — Россия; 7 — Украина

bridge [9], натрий-, кальций-, цинко- и алюмотермические, электролитическая, водородного восстановления и некоторые их разновидности) способ Кроля остается основным в производстве первичного титана в странах — производителях губчатого титана. Восстановление  $TiCl_4$  магнием применяется на КП «ЗТМК» (г. Запорожье, Украина), двух заводах США (компаний «Titanium Metals Corp.» и «Oregon Metallurgical Corp.»), двух заводах Японии (компаний «Osaka Titanium» и «Toho Titanium Company Ltd.»), в России (г. Березники, ВСМПО «АВИСМА») и Казахстане (г. Усть-Каменогорск, «УКТМК»), а также в Китае на предприятиях «Zunyi», «Fishnun» и др.

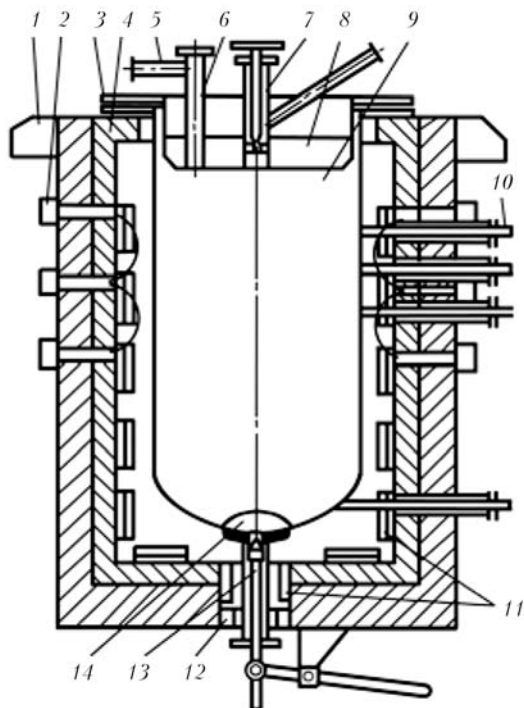


Рис. 3. Схема аппарата восстановления с нижним сливом, помещенного в печь [10]: 1 — опора печи; 2 — коллекторы подачи и отвода воздуха; 3 — водоохлаждаемое фланцевое соединение; 4 — футеровка печи; 5 — штуцер вакуумирования и подачи аргона; 6 — узел заливки магния; 7 — узел подачи  $TiCl_4$ ; 8 — крышка реактора; 9 — реактор; 10 — контактные термометры (термошупы); 11 — нагреватели; 12 — песочный затвор; 13 — шток сливного приспособления; 14 — ложное днище

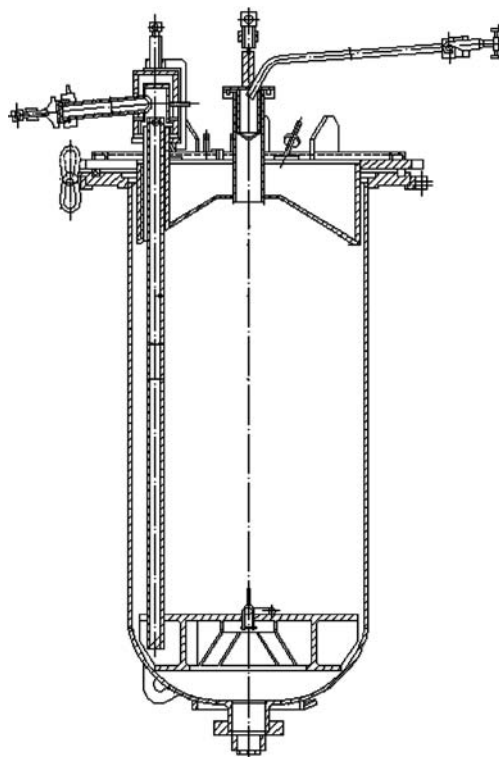


Рис. 4. Схема реактора для восстановления  $TiCl_4$  с верхним сливом

Аппарат для получения губчатого титана магнийтермическим способом состоит из электрической шахтной печи, реактора восстановления, коммуникаций подвода  $TiCl_4$ , аргона, воды, устройств контроля и регуляции процесса (рис. 3). На внутренней поверхности футеровки печи установлены нихромовые нагреватели, которые распределяются по зонам нагрева. В печи расположена система охлаждения реактора для подачи холодного и отвода горячего воздуха.

Основной элемент реактора восстановления (рис. 4) представляет собой цилиндр из коррозионностойкой стали 12X18H10T толщиной 15... 25 мм со сферическим днищем и водоохлаждаемым фланцем. Крышка реактора служит для его герметизации. На ней размещены узлы подачи в реактор исходных веществ и инертного газа, а также устройство для слива накапливающегося в реакторе хлорида магния.

Очищенный тетрахлорид титана вводят в заполненный аргоном герметичный реактор с предварительно залитым очищенным магнием. Восстановление титана из его тетрахлорида магнием является сложным гетерогенным процессом, сопровождаемым значительным выделением тепла, а также непрерывным изменением площади поверхности образующейся реакционной массы (РМ). Технологический процесс и характер формирования реакционной массы регулируют путем изменения скорости введения тетрахлорида титана, температуры проведения процесса восстановления и режима слива хлористого магния с целью получения продукции регламентированного состава.



Образующийся титан имеет вид губчатой (реакционной) массы, поры которой заполнены хлоридом магния и неиспользованным магнием. Для очистки титана применяют процесс вакуумной сепарации, осуществляемый в вакууме в аппарате при значении температуры до 1020 °С. Скорость прогрева блока реакционной массы и конденсации возгонов [11] в начальный период — главные факторы, определяющие скорость процесса вакуумной сепарации.

Возогнаннные и сконденсированные в оборотной реторте компоненты РМ (конденсат) направляют в оборот для использования в последующем процессе восстановления. Титан в виде губчатого блока выпрессовывается из реторты.

Структура титановой губки, ее физические характеристики (удельная поверхность, пористость) отражают суммарное влияние различных параметров как в ходе восстановления, так и вакуумной сепарации. Качество губчатого блока неодинаково в разных его частях, поэтому производится дифференцированная разделка и сортировка, для чего от блока отделяют богатые примесями периферийные части (гарнисаж, низы). После этого губчатый титан дробят и сортируют. Полученный материал является товарным продуктом.

Способ Кроля утвердился благодаря удачному сочетанию свойств в системе  $Ti-TiCl_4-Mg-MgCl_2$ . Магний характеризуется значительно более высоким химическим сродством к хлору, чем титан. Титан, магний и хлорид магния практически взаимно нерастворимы. Соотношение температур плавления и кипения магния и хлорида магния благоприятно для проведения процесса восстановления в широком интервале температур — от 720 до 1410 °С.

Однако максимальная температура ограничивается стойкостью стальной аппаратуры, поскольку выше 1000 °С контакт титана со сталью реактора может привести к образованию эвтектики и прогоранию стенки реактора, а также к переходу железа и никеля в прилегающие к стенке слои губки на глубину примерно 20...40 мм и ее загрязнению [12, 13].

Механизм процессов восстановления и формирования титановой губки довольно подробно изучен и описан в работах [14–18]. Основные закономерности и лимитирующие стадии процесса можно охарактеризовать таким образом:

восстановление тетрахлорида титана магнием представляет собой сложный физико-химический процесс, в котором одновременно или последовательно протекают несколько реакций. Так как в реальных условиях промышленного производства процесс восстановления носит не непрерывный, а дискретный характер, то условия реакций на разных стадиях и даже в разных зонах реактора постоянно изменяются, как и характер процессов;

скорость процесса восстановления определяется как скоростью подачи  $TiCl_4$  в реактор, так и процессами переноса (диффузии) магния в зону реакции и дихлорида магния из нее, а также связанными с ними процессами теплопередачи. Чем больше

скорость подачи  $TiCl_4$ , тем выше скорость процесса, однако скорость восстановления будет лимитироваться и скоростью поступления магния в реакционную зону, и отводом из нее тепла и продуктов реакции;

удерживание свободного магния в порах губки, особенно в конце процесса, ограничивает скорость и эффективность процесса восстановления, в связи с чем в промышленных условиях коэффициент использования магния не превышает 60...65 %;

с увеличением температуры скорость процесса возрастает, однако повышение температуры выше 850 °С способствует образованию мелкозернистой структуры, осложняющей процесс вакуумной сепарации, а также возникновению локальных перегревов и проплавлению стенки реактора в результате образования легкоплавкой эвтектики;

реакция восстановления протекает с уменьшением скорости и давления в объеме реактора вследствие уменьшения открытой поверхности магния и изменения фазового состава реагирующих веществ;

скорость ведения процесса восстановления в значительной степени определяет структуру блока губчатого титана и его пористость, что в свою очередь влияет на процесс вакуумной сепарации. Высокие скорости процесса восстановления приводят к образованию блока губчатого титана с большим количеством мелких пор, затрудняющих проведение процесса вакуумной сепарации и получения губчатого титана с требуемыми количествами хлора, азота, кислорода и других примесей. Поэтому для интенсификации процесса восстановления тетрахлорида титана и вакуумной сепарации РМ требуется разработка оптимальных режимов скорости подачи тетрахлорида титана, слива хлористого магния из реторты, а также процесса сепарации РМ.

В то же время магниетермический способ имеет следующие недостатки:

*недостаточно эффективное использование объема реактора восстановления*, поскольку все основные реакции восстановления тетрахлорида титана (и исходного сырья, и низших хлоридов титана как промежуточных продуктов) происходят в верхней части реактора — на поверхности расплава магния, образующихся дендритов титана и в газовой фазе. Весь остальной объем в начале процесса занимает расплав магния, в дальнейшем вытесняемый образующимся губчатым титаном и двуххлористым магнием. Причем перед каждым сливом  $MgCl_2$  зона реакции смещается вверх по высоте реактора, и если слив хлористого магния не был произведен вовремя, то зона реакции может переместиться даже под крышку, что приводит к преждевременной порче и выводу ее из эксплуатации вследствие коррозии. Кроме того, постоянное расположение зоны реакции в верхней части реактора способствует интенсивной высокотемпературной коррозии материала реактора в этой зоне из-за хлоридов титана и магния. Эта зона реактора подвержена дополнительной статической нагрузке при температуре 820...850 °С под воздействием массы реактора, загруженного магния и образующихся губчатого титана и двуххлористого магния. В результате интен-

сивного восстановления в верхней зоне реактора по его высоте формируется неравномерное тепловое поле — в верхней части выделяется значительное количество тепла, и эту зону приходится интенсивно охлаждать потоком воздуха, а нижние части — дополнительно подогревать нихромовыми нагревателями, расположенными в соответствующих зонах печи, из-за чего происходит образование окалины на внешней поверхности реактора. Все эти факторы вызывают преждевременный вывод из эксплуатации дорогостоящих реторт и дополнительное загрязнение производимого губчатого титана легирующими компонентами материала реактора;

*наличие длительного малопроизводительного процесса вакуумной сепарации.* В результате полного цикла восстановления в реакторе получают РМ, представляющую собой блок губчатого титана, пропитанного магнием и хлористым магнием. Для их удаления из блока используют процесс вакуумной сепарации, заключающийся в отгонке паров магния и хлористого магния из РМ в оборотную реторту в вакууме. Этот процесс состоит из трех стадий: дегазации и нагрева РМ; интенсивного испарения с поверхности РМ и крупных пор магния и хлористого магния; испарения в основном хлористого магния и оставшегося магния в мелких порах. Это самый продолжительный процесс, составляющий 65... 75 % общего времени сепарации. Продолжительность третьего периода зависит от длины пути паров хлористого магния. Наибольшей является длина пути паров Mg и  $MgCl_2$  из центральной зоны промышленного блока. Поэтому отгонка последних 2... 3 %  $MgCl_2$  является наиболее энергетически затратной и длительной стадией процесса вакуумной сепарации. Так, для сепарации 1 т губчатого титана теоретически требуется 1500 кВт·ч электроэнергии, на практике расходуется в 3... 4 раза больше [19];

*необходимость выполнения трудоемких и длительных операций по разделке блока губчатого титана,* заключающейся в колебаниях формы, размеров и массы блоков губки, полученных в аппаратах одинаковых размеров, а также неравномерная прочность блоков губчатого титана в различных зонах и неоднородность формы, особенно в верхней части. Предварительная разделка блока осуществляется в гидравлических прессах, однако в связи с выскальзыванием из-под инструмента блока, свободно лежащего на столе пресса, дробление возможно только при откалывании относительно крупных кусков толщиной более 0,3 м. Длительность операций по ориентации кусков губчатого титана на столе пресса составляет до 15 % общего времени переработки. Более 80 % общего времени занятости прессов затрачивается на подготовительные операции: подачу губки под нож столом пресса, холостой прямой и обратный ход ножа. Полезное использование мощности прессов не превышает 5 % [20]. Все эти сложности возникают из-за неравномерной структуры получаемого блока титановой губки — плотность губчатого титана в отдельных зонах блока колеблется в пределах 1... 3 т/м<sup>3</sup>, уменьшаясь снизу вверх и от центра к периферии. Блоки оди-

наковых размеров могут иметь различную среднюю плотность в зависимости от условий металлургического производства. Крупные блоки, как правило, имеют наибольшую плотность в нижней части. Высота и масса блоков, полученных в реакторах одного топоразмера, могут отличаться от среднего уровня на 5... 10 % [20].

**Цель и задачи работы.** Исследовали процесс магнийтермического восстановления тетрахлорида титана при порционно-периодической подаче магния (ППМ) под слой образующейся РМ с возможностью устранения недостатков способа Кроля.

Для достижения поставленной цели требовалось разрешить следующие задачи:

разработать конструкцию аппарата расплавления и загрузки магния, обеспечивающую возможность подачи порций магния и слива хлористого магния в процессе восстановления  $TiCl_4$ ;

разработать методологию проведения операций и режимы восстановления  $TiCl_4$  в ходе порционной подачи магния, обеспечивающие оптимальную скорость восстановления и вакуумной сепарации, а также высокое качество получаемого губчатого титана;

установить влияние способа загрузки магния на особенности протекания восстановления  $TiCl_4$  и последующей вакуумной сепарации полученной РМ;

**Проведение экспериментов.** Схема экспериментальной установки приведена на рис. 5. Установка включает два основных технологических аппарата: восстановления (реактор) и расплавления и подачи магния. Первый выполнен из нержавеющей стали марки 12X18H10T и состоит из реактора с водоохлаждаемым фланцем, герметично закрытым крышкой. Процесс восстановления осуществляется в реакционном стакане с внутренним диаметром 92 мм и высотой 250 мм, в который до начала эксперимента загружается первая навеска магния. Для поддержания необходимой температуры процесса восстановления реактор устанавливается в шахтную электропечь. Подача жидкого  $TiCl_4$  в аппарат осуществляется из расходной емкости. Защитная атмосфера в аппарате создается путем подачи аргона через штуцер в крышке реактора.

Плавильник магния, выполненный из нержавеющей стали, установлен в трубчатую электропечь. Загрузка кускового магния в плавильник производится через загрузочный люк, уплотненный термостойкой резиной. Подачу расплавленного магния в реактор восстановления осуществляли через запорное устройство и загрузочную трубу. Плавильник прикреплялся к загрузочной трубе с помощью узла крепления, ее обогрев (во избежание замерзания магния) производился трубчатым нагревателем.

В процессе исследований использовали очищенный тетрахлорид титана марки ОЧТ-0, магний марки МГ-0, аргон газообразный первого сорта (ГОСТ 10157-79). Измерения содержания примесей в получаемом губчатом титане из опытных процессов выполняли согласно ГОСТ 9853.24-96.

Проведены четыре процесса восстановления и вакуумной сепарации по экспериментальной схеме и один процесс по традиционной (базовой) технологии.

Для осуществления процессов восстановления в реакционный стакан загружали навеску магния 85 г и устанавливали его в реактор. Выполняли монтаж аппарата восстановления, помещали его в печь и вакуумировали до 50 Па, подавали воду для охлаждения фланцев и включали печь.

После сушки при 120 °С с одновременным вакуумированием аппарат восстановления заполняли аргоном до 120 кПа, после расплавления магния (по достижению температуры 800 °С) начинали подачу  $TiCl_4$  в аппарат. Скорость подачи  $TiCl_4$  регулировали в зависимости от стадии процесса и давления в аппарате. Она составляла 0,104... 0,170 г/см<sup>2</sup>·мин (62,4... 102 кг/м<sup>2</sup>·ч).

В это время в плавильнике наплавлялась очередная порция магния (255 г). После загрузки в аппарат расчетного количества тетрахлорида титана (в соответствии с принятым коэффициентом использования магния 60 %) его подачу прекращали, производили заливку магния из плавильника через загрузочную трубу в реакционный стакан, и процесс восстановления возобновлялся.

Перед подачей третьей и последующих порций магния осуществляли временный демонтаж плавильника, монтировали сливное устройство, и через загрузочную трубу с помощью избыточного давления аргона сливали наработанный расплав дихлорида магния.

Общая загрузка магния в процессе достигала 850 г, а порции состояли из первой 85 г и трех по 255 г, т. е. первоначально загружали 10 % необходимого, после чего по ходу процесса доливали три раза по 30 % общей массы загрузки. Всего за процесс подавали 1990 г. После последнего слива  $MgCl_2$  аппарат охлаждали, производили перемонтаж в аппарат сепарации и осуществляли вакуумную сепарацию полученной РМ.

На рис. 6 приведен график изменения массы веществ в реакторе по ходу процесса восстановления, позволяющий наглядно представить динамику их образования и расходования. Остановки на рисунке соответствуют пери-

одам заливки магния и слива  $MgCl_2$ . Начало оси отсчета времени представлено со 120 мин, что связано с продолжительностью герметизации, сушки и нагрева аппарата восстановления до необходимой температуры. Из графика следует, что по мере накопления образующегося титана, зона реакции восстановления, протекающей на поверхности образующейся губки, в ходе эксперимента постепенно перемещалась по высоте реакционного стакана. Соответственно, объем газового пространства над поверхностью расплава и губки, составлявший в начале процесса 90 %, постепенно сокращался и в конце процесса достигал 10... 20 % реакционного объема. РМ по завершению процесса восстановления занимала 80... 90 % объема реакционного стакана. Высота блока титановой губки, полученного после вакуумной сепарации, достигала 175... 200 мм, его масса — 480... 490 г.

Максимальная скорость загрузки  $TiCl_4$  для реактора данной конструкции (102 кг/м<sup>2</sup>·ч) лимити-

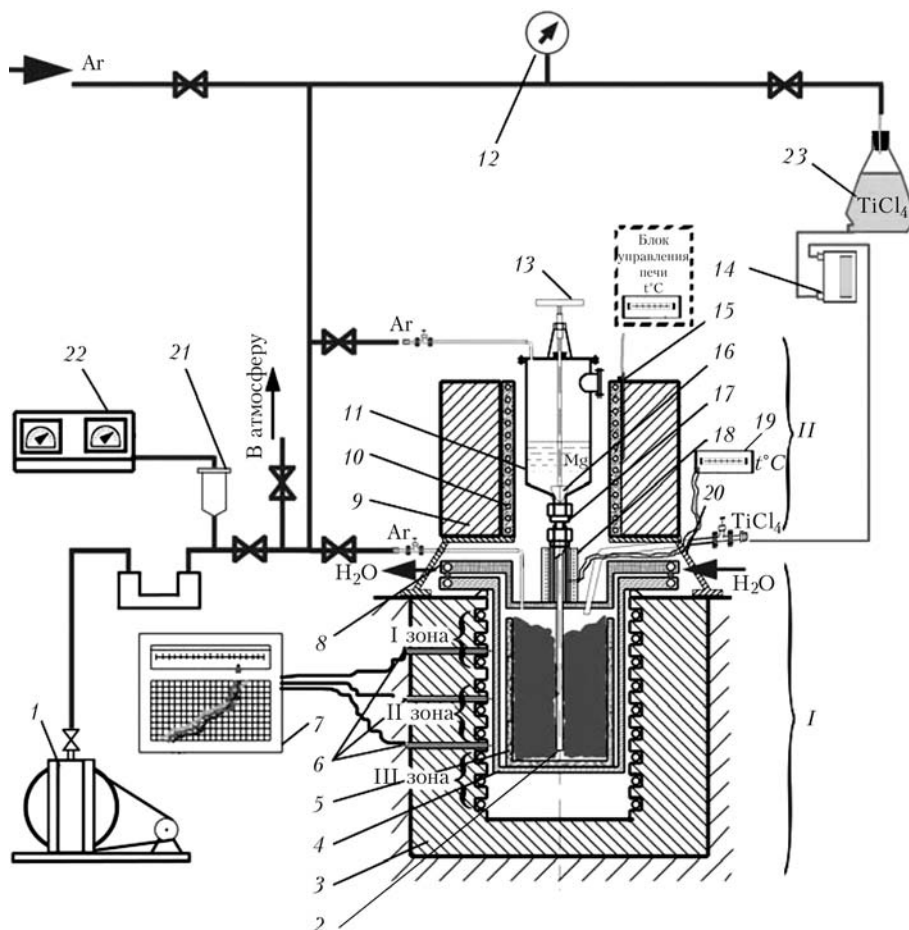


Рис. 5. Схема экспериментальной установки для получения титановой губки магниетермическим восстановлением тетрахлорида титана с порционно-периодической подачей расплава магния в реактор: I — аппарат восстановления; II — аппарат для расплавления магния; 1 — насос вакуумный ВН-461; 2 — загрузочная труба; 3 — печь электрическая; 4 — реактор; 5 — реакционный стакан; 6 — термопары хромель-алюмелевые (ХА); 7 — крышка; 8 — потенциометр КСП-4; 9 — печь плавильника электрическая; 10 — нагреватели печи плавильника; 11 — плавильник; 12 — мановакуумметр ОБМВ1-100; 13 — вентиль запирающего штока; 14 — ротаметр РС-3А; 15 — термопара ХА печи плавильника; 16 — запирающий шток; 17 — узел крепления плавильника к загрузочной системе реактора; 18 — трубчатый нагреватель; 19 — потенциометр ХА; 20 — подставка печи плавильника; 21 — преобразователь термометрический ПМТ-2; 22 — вакуумметр ВИТ-1А; 23 — расходная емкость  $TiCl_4$

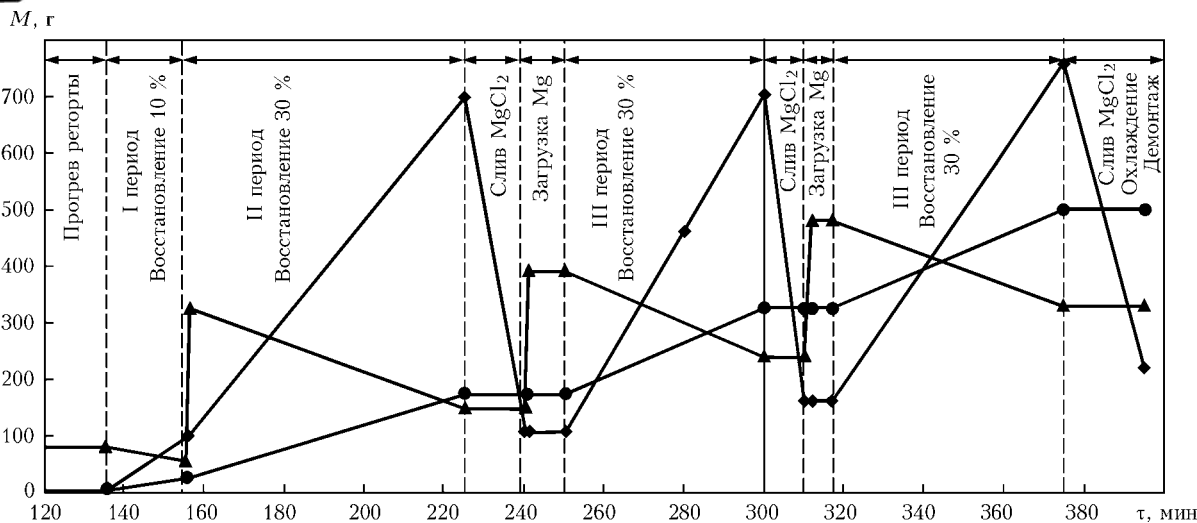


Рис. 6. Графики изменения массы  $M$  веществ в экспериментальном реакторе по ходу ведения процесса восстановления:  $\blacktriangle$  — магний;  $\bullet$  — титан,  $\blacklozenge$  —  $MgCl_2$

ровалась условиями испарения  $TiCl_4$  в реакционном стакане. При дальнейшем ее повышении обнаруживалось частичное смещение зоны реакции под крышку и зарастание крышки аппарата.

Стабильность загрузки порций расплавленного магния под слой образующейся РМ играет важнейшую роль в осуществлении предложенной технологии восстановления. Выполненные эксперименты показали принципиальную возможность проведения такой операции.

На время заливки восстановителя давление в аппарате восстановления стравливалось, а в плавильнике над расплавленным магнием создавалось избыточное давление аргона, максимальное значение которого при подаче последней порции магния составляло 165 кПа. Это обеспечивало достаточно быстрое передавливание расплавленного магния в аппарат восстановления.

График сливов дихлорида магния и нарастание его уровня в реакторе рассчитывали и организовывали таким образом, чтобы избежать потерь остаточного магния из аппарата и улучшить условия транспорта восстановителя в зону реакции к поверхности нарастающей губки при подаче очередных порций магния.

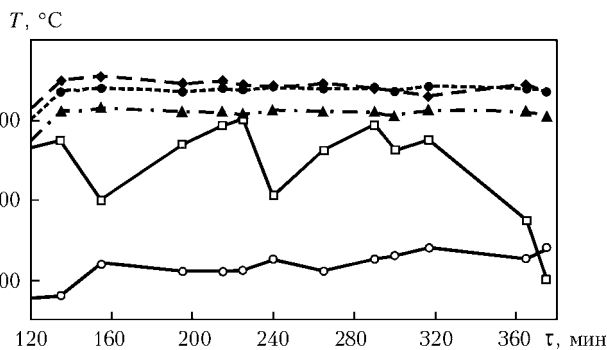


Рис. 7. График изменения значений температуры в печах аппарата восстановления и плавильника в ходе эксперимента:  $\blacktriangle$  — первая зона;  $\bullet$  — вторая зона;  $\blacklozenge$  — третья зона;  $\circ$  — температура обогрева магистрали;  $\square$  — температура в печи плавильника

Графики изменения температуры печей аппарата восстановления и плавильника при проведении экспериментальных процессов показаны на рис. 7.

Температура в реакционном стакане поддерживалась в пределах  $800 \dots 850 \text{ }^\circ\text{C}$ , что было обусловлено его расположением относительно зон печи и автоматическим регулированием температуры по зонам.

Постепенное изменение и подъем фронта процесса восстановления в реакционном стакане, сопровождавшиеся выделением избыточного тепла термохимической реакции, зафиксированы по изменению продолжительности и частоты включения нагревателей отдельных зон.

Процесс восстановления проводили в аппарате при значениях давления в пределах  $105 \dots 125 \text{ кПа}$  и в случае необходимости корректировали подпиткой аргона. Некоторое возрастание уровня давления происходило в начале процесса при первичной подаче  $TiCl_4$ , а также на завершающей стадии процесса после загрузки последней порции магния.

Это обусловило необходимость снижения скорости подачи  $TiCl_4$  в указанные периоды до  $62,4 \dots 84,0 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$ . Также зафиксировано возрастание давления в реакторе к моменту расходования расчетного количества магния ( $55 \dots 60 \%$ ) после каждой заливки, поскольку количество испаряющегося  $TiCl_4$  начинало превышать расходуемое на восстановление.

После подачи последней порции  $TiCl_4$  производили демонтаж установки восстановления, герметизацию и охлаждение аппарата восстановления до температуры окружающей среды, осуществляли вакуумтермическую очистку полученной РМ. Крышку аппарата с загрузочной трубой демонтировали, устанавливали тепловой экран и монтировали над реактором восстановления водоохлаждаемый конденсатор. Аппарат сепарации устанавливали в шахтную электропечь, подключали системы подачи аргона, водяного охлаждения и вакуумирования, начинали процесс разогрева и вакуумирования РМ.



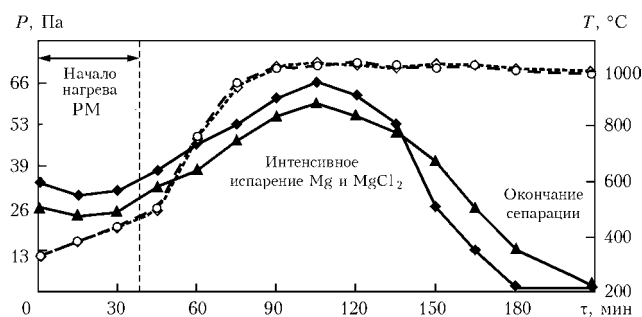


Рис. 8. Изменение давления  $P$  и температуры в реакторе при вакуумной сепарации экспериментального и традиционного блоков:  $\blacklozenge$ ,  $\blacktriangle$  — давление соответственно в экспериментальном аппарате и в аппарате сравнения;  $\circ$ ,  $\diamond$  — температура печи соответственно экспериментального процесса и процесса сравнения

Предварительную откачку выполняли при помощи механического вакуумного насоса АВЗ-20. При понижении давления на выходе из аппарата сепарации до 30 Па включали бустерный насос ВН-461 для глубоковакуумной откачки. Давление на выходе из аппарата сепарации измеряли с помощью термометрических вакуумметров ВИТ-1А и ВТ-2А. Высокотемпературную выдержку осуществляли при 980... 1020 °С и завершали при достижении давления 3,5... 3,0 Па. Нагнетание аппарата проверяли в течение 5 мин и зафиксировали его отсутствие.

На рис. 8 представлены графики изменения температуры и давления в аппарате в период вакуумной сепарации. Начало возрастания давления при непрерывной откачке обнаружено при значениях температуры выше 600 °С в связи с началом интенсивной возгонки Mg и MgCl<sub>2</sub>.

Выход гарнисажной губки в экспериментах составлял 5... 12 %, что примерно в два раза ниже, чем для традиционного способа. Очевидно, это обусловлено тем, что на завершающей стадии процесса транспорт магния в зону реакции практически полностью лимитировался капиллярными процессами в губке, а распределение капилляров по сечению блока было относительно равномерным.

Изучение очищенной вакуумной сепарацией губки показало, что блок титановой губки имеет слоистое строение с размерами слоев в нижней части блока, относительно пропорциональными порциям загружаемого магния. Структура полученной в ходе эксперимента губки представлена на рис. 9.

Слоистость полученных блоков в основном определяется изменением механизма и скорости реакции восстановления по ходу процесса. Характер и распределение крупных пор (более 500 мкм) соответствует направлению движения восходящих потоков магния и нисходящих потоков образующегося дихлорида магния.

Основной диапазон более мелких пор составлял 50... 200 мкм, а общая пористость губки достигала 20... 50% при плотности 1,2... 2,5 г/см<sup>3</sup>. Такая структура блока способствует сокращению продолжительности высокотемпературной выдержки в процессе вакуумной сепарации блока РМ.

Массовая доля основных примесей в полученной губке следующая, %: 0,020... 0,046 Fe; 0,032... 0,037 Ni; 0,040... 0,050 O; 0,01... 0,02 N; 0,023... 0,050 Cl, что соответствует их содержанию в товарном губчатом титане марок ТГ-90–ТГ-120.

**Результаты экспериментов и их обсуждение.** При подаче в реактор первой порции магния и TiCl<sub>4</sub> происходит реакция восстановления. Образовавшиеся первые дендриты титана служат рафинирующим адсорбентом примесей из магния, который связывает их, и оседая на дне реактора, образует в донной части блока хрупкие структуры соединений титана с примесями.

При подаче следующей порции магния через донную часть блока рафинирование осуществляется на дендритах титана в донной части блока. При этом в зону реакции поступает уже рафинированный магний, обеспечивающий высокую скорость процесса восстановления и получения качественной губки.

Механизм процесса восстановления при порционно-периодической подаче магния под слой РМ можно представить следующим образом. В начальный период восстановления он характеризуется высокой скоростью, а возрастание объема газовой фазы над зеркалом расплава магния примерно в 2 раза позволяет соответственно увеличить интенсивность газофазных реакций, образование низших хлоридов и активных центров начала процесса. Схема таких реакций приведена на рис. 10.

В экспериментальных процессах скорость подачи TiCl<sub>4</sub> и интенсивность восстановления в начальный период (для 1- и 2-й загрузки магния) в 1,2... 1,5 раза превышают скорость потребления

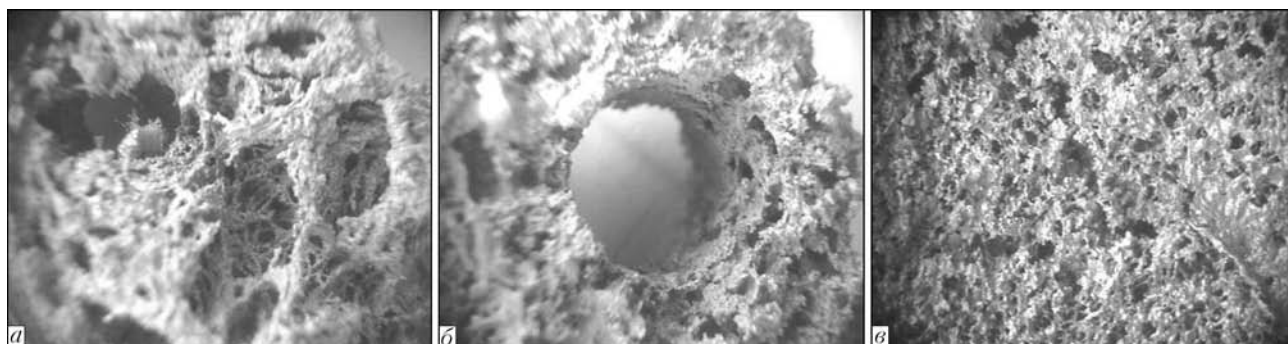


Рис. 9. Структура (X5) титановой губки, полученной на экспериментальной установке: а — центр блока; б — отверстие от трубы; в — поверхность блока

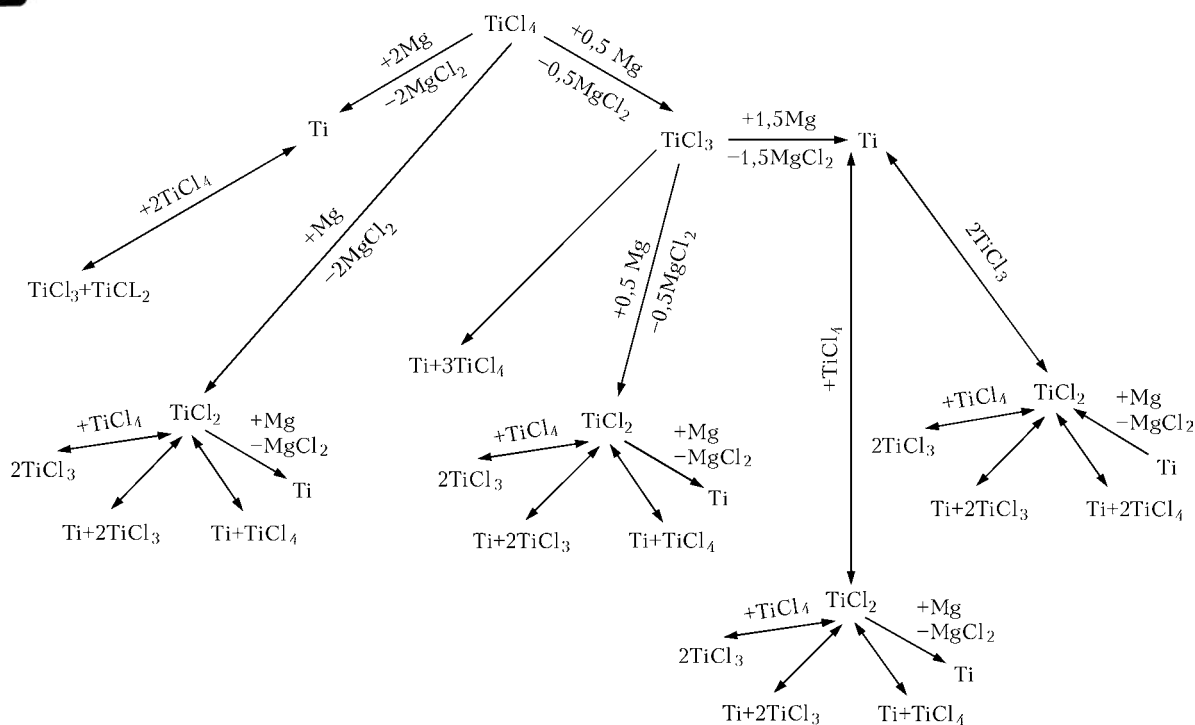


Рис. 10. Схема газофазных реакций, развивающихся над зеркалом расплава

$TiCl_4$  для базового процесса, а продолжительность индукционного периода процесса сокращается (рис. 6).

В дальнейшем, по мере развития поверхности образующейся титановой губки, механизм экспериментального процесса существенно не отличался от традиционного.

Все большее развитие приобретают процессы образования титана на поверхности губки, а также на смачиваемых расплавленными магнием и  $MgCl_2$  стенках реактора и загрузочной трубы. Повышенное образование низших хлоридов титана (НХТ) может вызвать некоторое ухудшение качества расплава дихлорида магния.

Однако, как показали эксперименты, содержание титана в сливаемом  $MgCl_2$  не превышало допустимого уровня (0,005 %), а зарастания губкой загрузочной трубы не обнаружено. Это свидетельствует о том, что по ходу процессов произошло достаточно полное довосстановление НХТ. Послед-

ние обычно происходят на поверхности и в капиллярах губки (через стадию адсорбции), на поверхности расплава магния и в расплаве  $MgCl_2$  при его противоточном расслоении с магнием.

Поскольку в экспериментальных процессах была получена более крупнокристаллическая губка, вероятно, довосстановление происходило преимущественно через стадию растворения  $TiCl_2$  в расплавленном  $MgCl_2$ .

Особенностью механизма процесса восстановления при ПППМ является повышенная роль дихлорида магния при транспорте восстановителя в зону реакции на завершающей стадии процесса. Наличие сформировавшегося блока титана и незначительный объем последней заливки магния требовал неполного слива  $MgCl_2$  и создания «подушки» расплава  $MgCl_2$ , позволяющей за счет расслоения ускорить транспорт магния-восстановителя по капиллярам в зону реакции.

В процессе восстановления при расходовании всей расчетной массы реагентов (магния и  $TiCl_4$ ) получали блоки РМ, которые подвергали вакуумной сепарации. Сравнение графиков изменения остаточного давления при сепарации блоков (рис. 8), полученных по экспериментальной и базовой технологиям восстановления, свидетельствует об интенсификации процесса для экспериментального блока РМ.

Экспериментальный блок РМ (рис. 11, а) отличается от блока РМ, полученной по базовой технологии (рис. 11, б) тем, что имеет сквозное отверстие в центре блока.

Поскольку скорость испарения летучих компонентов РМ пропорциональна поверхности испарения, наличие сквозного отверстия в центре блока после извлечения загрузочной трубы увеличивает

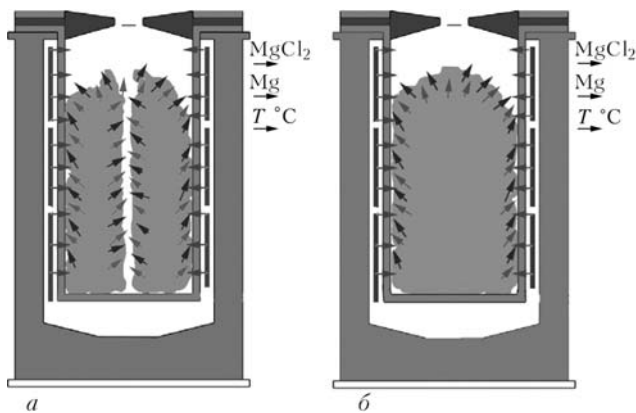


Рис. 11. Схема вакуумной сепарации РМ, полученной при ПППМ под слой расплава (а) и традиционной загрузке расплава магния (б)

интенсивность процесса испарения на первой стадии вакуумной сепарации.

На второй стадии процесса сепарации наличие сквозного отверстия способствует интенсификации диффузионных процессов при сокращении длины пути паров дихлорида магния по капиллярам в титановой губке. В итоге сократилась не только продолжительность сепарации для экспериментальной РМ на 10... 15 % (30 мин), но и уменьшилось остаточное содержание иона хлора в полученной титановой губке.

Интенсивность испарения из капилляра в блоке титановой губки зависит от положения мениска расплава магния и хлористого магния относительно края капилляра.

Массовая плотность потока пара вещества определяется таким уравнением:

$$M = \frac{P_0 D \mu}{RTl} \ln \left( \frac{P_0 - P_1}{P_0 - P_S} \right),$$

где  $M$  — массовая плотность потока пара,  $\text{г}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$ ;  $l$  — расстояние от поверхности расплава до края капилляра, см;  $\mu$  — молярная масса пара,  $\text{г}/\text{моль}$ ;  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $\text{Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$ ;  $P_0$  — общее давление в системе, Па;  $P_1$  — парциальное давление пара, Па;  $P_S$  — давление насыщенного пара, Па;  $D$  — коэффициент диффузии,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;  $T$  — температура, К.

Скорость испарения вещества описывается следующим уравнением:

$$v = \frac{M}{\rho},$$

где  $\rho$  — плотность испаряемого вещества,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Примем расстояние от поверхности испарения на блоке титановой губки (длину капилляра) равным  $l$ , тогда длина капилляра в блоке титановой губки, полученной по экспериментальной технологии, составит  $0,5l$ . Это объясняется тем, что отверстие от загрузочной трубы находится в середине экспериментального блока, и расстояние, которое необходимо пройти сепарируемым магнию и хлористому магнию, составляет половину радиуса (принимается что магний и  $\text{MgCl}_2$  испаряются из цилиндрической трубы блока РМ). Тогда при равенстве всех остальных условий проведения вакуумной сепарации экспериментального и традиционного блоков РМ, а также характеристик веществ и их доли в РМ, разница в массовой плотности потока пара из экспериментального блока  $M_{\text{эксп}}$ , по сравнению с традиционным  $M_0$ , составит:

$$\frac{M_{\text{эксп}}}{M_0} = \frac{1}{0,5},$$

т. е. массовая плотность потока пара из экспериментального блока в два раза превысит массовую плотность потока пара из традиционного блока ( $M_{\text{эксп}} = 2M_0$ ).

Создание условий для образования открытых или сквозных капилляров в блоке РМ обеспечит

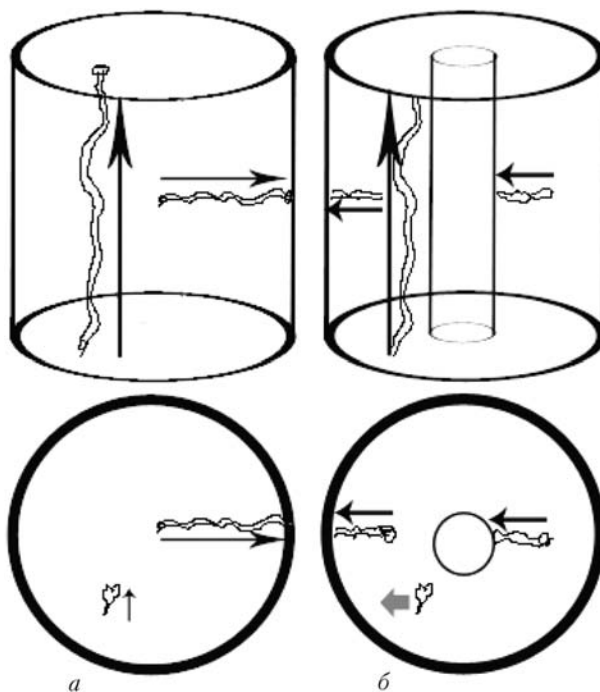


Рис. 12. Схема испарения (сепарации) магния и  $\text{MgCl}_2$  из блоков титановой губки, полученных по традиционной (а) и экспериментальной (б) технологиям

значительное повышение скорости сепарации и сокращение длительности процессов получения титановой губки. Предложенный процесс иллюстрирует рис. 12.

## Выводы

1. Показана следующая принципиальная возможность порционной загрузки магния под слой образующейся РМ по мере протекания процесса восстановления.
2. Достигнута интенсификация и полнота процесса рафинирования магния.
3. Повышена эффективность вакуумной сепарации РМ, полученная при проведении процесса порционно-периодической подачи магния.
4. Увеличена производительность аппарата на начальной стадии процесса восстановления вследствие интенсификации газофазных реакций над зеркалом расплава.
5. Снижена длительность высокотемпературной выдержки при вакуумной сепарации блоков, полученных при использовании процесса порционно-периодической подачи магния.
6. Получена титановая губка с большим выходом годной продукции вследствие уменьшения загрязнения примесными элементами, поступающими из материала реактора.

1. *Металлургия титана* / В. А. Гармата, Б. С. Гуляницкий, В. Ю. Крамник и др. — М.: Metallurgy, 1966. — 643 с.
2. *Металлургия титана* / В. А. Гармата, А. Н. Петрунько, Н. В. Галицкий и др. — М.: Metallurgy, 1983. — 559 с.
3. *Полькин И. С. Применение титана в различных отраслях промышленности // «Ti-2006 в СНГ»: Сб. тр. междунар. конф. (РФ, Суздаль, 21–24 мая 2006 г.). — Киев: ИМФ им. Г. В. Курдюмова, НАН Украины, 2006. — С. 28–38.*



4. *Полькин И. С.* Упрочняющая термическая обработка титановых сплавов. — М.: Металлургия, 1984. — 96 с.
5. *Колачев Б. А., Елагин В. К., Ливанов В. А.* Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. 3-е изд. — М.: МИСиС, 1999. — 416 с.
6. *Александров А. В.* Развитие рынка титана в СНГ // «Ti-2009 в СНГ»: Сб. тр. междунар. конф. (Украина, Одесса, 17–20 мая 2009 г.). — Киев: ИМФ им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, 2009. — С. 7–11.
7. *Hart A., Perre W.* Prospects consumption of titanium // Intern. conf. «Titanium» (San-Diego, USA 3–6 Oct. 2006). Washington, 2006. — P. 109–112.
8. *Новый способ* получения губчатого титана с использованием SOM-технологии // Shanghai Metals. — 2005. — 27, № 2. — С. 40–43.
9. *Экспериментальное* изучение процесса электролитического получения титана из его диоксида по способу FFC Cambridge Process / Н. П. Криворучко, В. М. Проценко, Л. Н. Петрунько и др. // 36. наук. праць Запоріж. держ. інж. акад. Сер. Металургія. — 2004. — № 10. — С. 59–64.
10. *Мальшин В. М., Завадовская В. Н., Пампушко Н. А.* Металлургия титана. — М.: Металлургия, 1991. — 208 с.
11. *Исследование* состава возгонов и их поведения в процессе магнетермического производства титана // А. П. Яценко, А. Н. Петрунько, С. М. Лупинос и др. // «Ti-2008 в СНГ»: Сб. тр. междунар. конф. (РФ, Санкт-Петербург, 18–21 мая 2008 г.). — Киев: ИМФ им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, 2008. — С. 149–157.
12. *Червоний И. Ф., Иващенко В. И., Листопад Д. А.* О разрушении материала реторты в процессе восстановления четыреххлористого титана // Титан. — 2007. — № 1. — С. 5–12.
13. *Problems of safety of unit of an increased cycle efficiency for magnesium-thermic producing of spongy titanium* / S. M. Teslevich, V. V. Telin, A. N. Petrunko et al. // Advances in Electrometallurgy. — 2004. — № 2. — С. 45–48.
14. *Сандлер Р. А.* К вопросу о механизме взаимодействия четыреххлористого титана при оптимальном температурном режиме восстановления // ЖПХ. — 1960. — 33, вып. 5. — С. 1013–1017.
15. *Власов В. В., Сандлер Р. А., Огурицов С. В.* Некоторые особенности формирования блока титановой губки в процессе магнетермического восстановления // Тр. ВАМИ. — 1966. — № 57. — С. 208–217.
16. *Пампушко А. Н.* Взаимодействие тетрахлорида титана и магния при производстве губчатого титана // Цвет. металлург. — 1988. — № 9. — С. 21–23.
17. *Огурицов С. В., Резниченко В. А., Сергеев В. В.* Основные условия стандартного протекания магнетермического процесса получения титана // Титан и его сплавы. — 1961. — Вып. 6. — С. 3–13.
18. *До питання* про механізм утворення губчатого титану при відновленні чотирихлористого титану магнієм / Д. О. Листопад, І. Ф. Червоний, А. Н. Петрунько та ін. // Вісті акад. інж. наук України. — 2008. — № 2. — С. 25–34.
19. *Сергеев В. В., Безукладников А. Б., Мальшин В. М.* Металлургия титана. — М.: Металлургия, 1979. — 264 с.
20. *Переработка* блоков губчатого титана / Р. А. Сандлер, А. Н. Петрунько, В. А. Лихтерман, А. Н. Павлюченко // Пробл. цвет. металлург. — М.: Металлургия, 1987. — 158 с.

Запорж. гос. инж. акад.

Поступила 11.06.2009



## ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ

им. Е. О. ПАТОНА НАН Украины

объявляет ежегодный набор по следующим специальностям:

### ДОКТОРАНТУРА

- ☞ сварка и родственные процессы и технологии
- ☞ автоматизация процессов управления
- ☞ металловедение и термическая обработка металлов
- ☞ металлургия черных и цветных металлов и специальных сплавов
- ☞ диагностика материалов и конструкций

### АСПИРАНТУРА

- ☞ сварка и родственные процессы и технологии
- ☞ автоматизация процессов процессов
- ☞ металловедение и термическая обработка металлов
- ☞ металлургия черных и цветных металлов и специальных сплавов
- ☞ диагностика материалов и конструкций

Прием в аспирантуру проводится в сентябре.

Контактный телефон: (044) 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



## ВСТРЕЧА ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ СОВЕТОВ НАУЧНОЙ МОЛОДЕЖИ ИНСТИТУТОВ НАН УКРАИНЫ

**25 декабря 2009 г.** в Институте электросварки состоялась встреча представителей Советов научной молодежи (СНМ) институтов НАН Украины материаловедческого физико-технического направления. В заседании приняли участие 38 представителей 13 институтов из 5 городов Украины.

Каждый совет представил свою презентацию с отображением основных научных направлений деятельности молодых сотрудников институтов, а также информации о мероприятиях и программах СНМ, направленных на привлечение молодежи в академические институты, создание условий для их профессионального роста.

Ни один из представленных материалов не повторял другие, что свидетельствует, с одной стороны, о большом количестве возможных полезных программ для молодых сотрудников, а с другой, — о разобщенности и несогласованности действий молодежных советов между собой. В связи с этим было выдвинуто предложение о создании СНМ институтов при отделении Национальной академии наук Украины.

Присутствующие на встрече отметили, что для научного развития молодых ученых очень важны молодежные конференции. Поэтому полезно проведение совместной открытой молодежной конференции по физико-техническому направлению.

Данная встреча была интересна и полезна сотрудникам нашего института. Члены СНМ Института электросварки им. Е. О. Патона выделили несколько пунктов работы, проводимой в других институтах, которые могут быть реализованы в нашем.

3 февраля 2010 г. информация о встрече и намеченные предложения были заслушаны на совещании у директора Института электросварки им. Е. О. Патона.

Кроме вопросов о создании молодежного совета при отделении Академии наук и проведении совместной конференции, участники совещания поддержали такие предложения:



премировать соискателей при защите кандидатской диссертации до 35 лет, а также при защите докторской диссертации до 45 лет;

оказывать содействие аспирантами и молодым научным сотрудникам в публикациях научных статей в профильных журналах института;

организовать курсы по совершенствованию знания иностранных языков для молодых сотрудников на территории института;

наладить работу со студенческими молодежными организациями вузов с целью привлечения молодых специалистов для работы в Институте электросварки им. Е. О. Патона.

Также СНМ предложил для поощрения молодых сотрудников награждать их дипломами в честь выдающихся ученых института по основным научным направлениям.

Надеемся, что эта новая традиция позволит молодежи больше узнать об истории института.

В этом году СНМ Института электросварки им. Е. О. Патона значительно обновился. В него пришла активная и инициативная молодежь. Хочется пожелать им успехов в научной и общественной работе, а также максимальной реализации новых идей!

*С. Г. Григоренко*



## ПРОБЛЕМЫ РЕСУРСА И БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ, СООРУЖЕНИЙ И МАШИН

(итоговая научная конференция в ИЭС им. Е. О. Патона)

22 января 2010 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона состоялась итоговая научная конференция, посвященная рассмотрению научных и прикладных результатов, полученных в течение 2007–2009 гг. при выполнении проектов целевой комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации конструкций, сооружений и машин». В работе конференции приняли участие научные руководители и исполнители проектов, а также представители заинтересованных министерств, ведомств, учебных и отраслевых институтов, промышленных предприятий и организаций.

Конференцию открыл научный руководитель программы Президент Национальной академии наук Украины академик Б. Е. Патон, который отметил, что «...сегодня особую активность преобретают проблемы управления эксплуатационной надежностью и долговечностью ответственных объектов путем определения их технического состояния, остаточного ресурса и установления научно обоснованных терминов эксплуатации». На решение этих проблем и направлена комплексная программа НАН Украины. Ее цель — создание методологических основ, технических средств и технологий для оценки и продления ресурса ответственных объектов длительной эксплуатации. К выполнению этой программы, состоящей из девяти разделов, включающих 118 проектов, привлечены 26 институтов восьми отделений НАН Украины. По мнению Б. Е. Патона, в течение трех лет получены важные научно-технические и практические результаты. Среди них следующие:

- разработка методики оценки прочности и долговечности трубопроводов на основе двукритериальной диаграммы разрушения при наличии стресс-коррозионных дефектов с регламентированием допустимого коэффициента запаса прочности и предложенной процедурой расчета его реального значения;

- разработка технологии ремонтной сварки корпусных деталей паровых турбин и арматуры высокого давления для продления ресурса турбоагрегатов ТЭС;

- расчет по критериям механики разрушения допустимых размеров трещиноподобных дефектов в стенках питающих трубопроводов энергоблоков сверхкритического давления ТЭС в зависимости от их формы и содержания примесей в рабочей среде;



- отработка технологии изготовления низкочастотных пьезокерамических двухкомпонентных акселерометров для вибрационного контроля главных циркуляционных насосов АЭС при эксплуатации в условиях температур до 300 °С. Изготовлены опытные образцы акселерометров и исследованы их характеристики;

- выполнены работы по оптимизации сварочных технологий и материалов для восстановления и продления ресурса действующих мостов. Создан полуавтомат для восстановления дуговой сваркой подводных металлоконструкций с целью продления их ресурса;

- созданы и внедрены в КБ «Южное» технология и оборудование для диагностики элементов конструкций из композиционных материалов методами лазерной интерферометрии;

- разработаны и исследованы образцы слоистокombинированных волокнистых композиционных материалов, на основе которых созданы эластичные взрывозащитные камеры для безопасной резки и обработки металлоконструкций;

- изготовлены для нефтехимической отрасли опытная партия эмали с использованием модифицированных полиуретановых лакокрасочных материалов для противокоррозионных покрытий и проведена опытно-промышленная проверка с нанесением ее на элементы оборудования и трубопроводы Лисичанского нефтеперерабатывающего комбината;

- разработана технология, повышающая в 3–4 раза ресурс долот для бурения скважин при добыче рассеянного или шахтного металла;

- установлено, что длительная эксплуатация создает значительные изменения электрических



свойств металла стенки магистральных трубопроводов. Построены корреляционные зависимости между изменениями механических и электрохимических свойств, которые открывают возможности прогнозирования эксплуатационной надежности металла трубопроводов.

В процессе выполнения программы получены и другие важные научно-технические и практические результаты. Вместе с тем, по мнению Б. Е. Патона, программа содержала ряд мелких проектов, не имеющих ясных перспектив использования полученных результатов.

Важно отметить, что научный совет программы обеспечил подготовку издания итогового сборника научных статей проектов программы «Проблемы ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» (Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2009. — 710 с). Сборник содержит основные научные и прикладные результаты работ, полученные при выполнении проектов (заказать сборник можно в ИЭС им. Е. О. Патона по тел. 529-26-23).

На конференции также выступили научные руководители разделов программы.

Академик НАН Украины В. И. Махненко, научный руководитель раздела «Разработка методологических основ оценки технического состояния и обоснованности безопасного срока эксплуатации конструктивных элементов объектов повышенной опасности на территории Украины», в своем выступлении сообщил, что все шесть проектов раздела программы связаны с ответственными объектами такими, как парогенераторы (атомная энергетика), магистральные трубопроводы, железнодорожный транспорт, жилищные и производственные строения в зоне шахтных выработок. По всем этим направлениям получены важные результаты.

Академик НАН Украины З. Т. Назарчук, научный руководитель раздела «Разработка методов и новых технических средств неразрушающего контроля и диагностики состояния материалов и изделий длительной эксплуатации», в своем докладе отметил, что создана эффективная система мони-

торинга, новые средства неразрушающего контроля качества элементов ряда жизненно важных объектов, а также подготовлена к серийному производству новая диагностическая аппаратура.

Научный руководитель раздела «Разработка методов защиты от коррозии элементов конструкций объектов длительной эксплуатации» чл.-кор. НАН Украины В. И. Похмурский подчеркнул, что в перечне наиболее важных результатов выполненных проектов следует отметить разработку покрытия для повышения эксплуатационной надежности труб и котлов электростанций, разработку покрытий для защиты от фреттинг-коррозии, разработку методов защиты от коррозии стальной арматуры для продления ресурса железобетонных конструкций. Он отметил важность создания государственной целевой программы работ по защите от коррозии конструкций мостов и других объектов в базовых отраслях промышленности Украины вплоть до 2015 г.

По разделу «Разработка эффективных методов оценки и продления ресурса объектов атомной энергетики» (научный руководитель — академик НАН Украины И. М. Неклюдов) выступил д-р техн. наук В. Н. Воеводин. Он подчеркнул, что основная часть проектов подраздела выполнена с участием АЭС Украины. Проанализировано напряженно-деформированное состояние корпусов реакторов ВВЭР-1000, парогенераторов и сварных швов трубопроводов турбинного отделения энергоблоков Запорожской и Южно-Украинской АЭС. Установлены основные причины разрушения трубопроводов обвязки, предложена экспертная методика их контроля с помощью магнитных методов.

Академик НАН Украины Б. С. Стогний, подводя итоги исследований по разделу «Повышение надежности и продление ресурса энергетического оборудования и систем», отметил, что получены важные результаты, которые будут использованы для повышения надежности и увеличения сроков службы турбин, генераторов, оборудования станций газоперекачки, а также при модернизации котельного оборудования коммунальной энергетики и угольных энергоблоков. Благодаря проведенным исследованиям сформулированы и обоснованы основные мероприятия для увеличения ресурса работы элементов котельного оборудования децентрализованной теплоэнергетики.

О научных результатах, полученных по разделу «Создание систем мониторинга технического состояния трубопроводов и объектов газо- и нефтеперерабатывающей промышленности», сообщил его научный руководитель чл.-кор. НАН Украины А. Я. Красовский. К наиболее важным достижениям он отнес создание компьютерной системы обеспечения целостности магистрального трубопровода, разработку универсального алгоритма расчета давления в составляющих трубопроводной системы, оценку конструкционной прочности трубопроводов с дефектами.

Выступление академика НАН Украины Л. М. Лобанова было посвящено полученным результатам



по 22 проектам раздела «Повышение надежности и продление ресурса мостов, строительных, промышленных и транспортных конструкций». Среди них разработка технологии ремонтной сварки корпусных деталей турбин, разработка низководородных электродов для сварки и ремонта мостовых и транспортных конструкций и др.

О результатах, полученных по проектам раздела «Разработка технологий ремонта и восстановления элементов конструкций объектов повышенной опасности с целью продления сроков их эксплуатации» (научный руководитель академик НАН Украины К. А. Ющенко), доложил д-р техн. наук О. Г. Касаткин.

Научный руководитель раздела программы «Подготовка и издание нормативных документов и научно-технических пособий по вопросам оценки ресурса объектов длительной эксплуатации» академик НАН Украины В. В. Панасюк в своем выступлении отметил, что в течение 2007–2009 гг. подготовлены и вышли в свет современные научно-технические справочные пособия в помощь инженерно-техническим работникам конструкторских и промышленных предприятий для оценки долговечности и надежности (ресурса) элементов конст-

рукций длительной эксплуатации, в частности мостовых и строительных конструкций, тепловых и атомных электростанций, трубопроводов и т. п.

Затем состоялось обсуждение научных результатов, изложенных в докладах научных руководителей разделов программы, в котором приняли участие д-ра техн. наук В. И. Король (директор Донбасского центра технологической безопасности), П. И. Кривошеев (директор НИИ строительных конструкций), А. И. Лантух-Лященко (профессор кафедры мостов и туннелей Национального транспортного университета), В. И. Большаков (директор ИЧМ им. З. И. Некрасова).

Все выступившие отметили актуальность и важность полученных результатов для решения проблемы ресурса объектов длительной эксплуатации, высказали мнение о целесообразности продолжить выполнение программы «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» в 2010–2012 гг.

В заключение академик Б. Е. Патон отметил: «...считаю, что нам нужно поддержать предложение научного совета относительно продления выполнения программы «Ресурс» в последующие три года. Необходимо поручить научному совету сформировать новые этапы работ, сконцентрировав научные силы на наиболее актуальных направлениях исследований, предусмотрев прежде всего практическое использование полученных результатов. При этом особенно подчеркиваю, что при проведении конкурса первоочередное внимание необходимо обратить на финансирование комплексных крупных работ, а не расплывать средства на выполнение мелких проектов». В завершение принято решение отчетной конференции.

*О. Г. Касаткин,  
В. Н. Липодаев*





## ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

**Ляпина К. В.** «Разработка технологических основ изготовления пористых и порошковых металлических материалов методом их вакуумного осаждения в парах галогенидов щелочных металлов. — Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 174 «Металлургия черных и цветных металлов и специальных сплавов» — Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, 2009. Дата защиты 14 октября 2009 г.

Работа посвящена установлению закономерностей влияния условий вакуумного осаждения металлов в присутствии паров галогенидов щелочных металлов на характеристики микроструктуры конденсатов, а также разработке на этой основе способов получения пористых и неконсолидированных (порошковых) материалов функционального назначения.

Для достижения поставленной цели способом электронно-лучевого осаждения получены конденсаты ряда металлов (меди, никеля, железа, хрома и титана) в парах галогенидов щелочных металлов (KCl, KF, NaCl и NaF) при варьировании основных параметров процесса (температура подложки, соотношение паровых потоков соль/металл и скорость осаждения металла). Для полученных таким образом конденсатов способами сканирующей и просвечивающей микроскопии и рентгеноструктурного анализа определяли их фазовый состав и характеристики микроструктуры.

В результате исследований установлено, что при соотношении паровых потоков соль/металл меньше, чем 0,5, и температурах подложки выше, чем температура плавления соли, формируются конденсаты металла с пористой структурой. Показано, что характеристики пористой структуры (пористость, тип пористости, средний размер пор, их форма и т. п.) конденсатов металлов, не имеющих полиморфных переходов, немонотонно зависят от температуры подложки и могут быть описаны кривой с максимумом. При этом удельная поверхность пористых конденсатов по данным ртутной и газовой порометрии возрастает до  $100 \text{ м}^2/\text{г}$ , а общая пористость и доля открытой пористости достигают максимального уровня (до 40 и до 30 об. %) при температуре подложки около  $0,5 T_{\text{пл}}$ , где  $T_{\text{пл}}$  — температура плавления металла. В случае металлов с полиморфными переходами пористость возрастает монотонно с повышением температуры подложки, оставаясь преимущественно открытой.

Предложен способ получения материалов с контролируемыми характеристиками пористой структуры, такими как тип пористости (закрытая или открытая), форма и средний размер пор, а также общая пористость (получен патент Украины). На этой основе разработали электронно-лучевой способ получения материалов для имплантатов или их покрытий с объемной долей пор открытого типа в диапазоне 10... 30 % и размерами пор 20... 40 мкм, способных обеспечить поглощение лекарственного препарата и его замедленный выход в биологическую среду, что позволит улучшить процесс вживления таких материалов.

При одновременном осаждении металлов и солей щелочных металлов при температуре подложки ниже температуры плавления соли отмечено формирование конденсатов с композитной структурой каркасного типа, характеристики которой зависят от соотношения паровых потоков соль/металл.

Впервые показано, что при соотношениях паровых потоков соль/металл более 0,5 характеристики металлической компоненты композитной структуры претерпевают качественные изменения — с каркасной (консолидированной) на дисперсную (неконсолидированную). При этом характерные размеры дисперсных частиц металлической компоненты могут быть уменьшены примерно до 2... 4 нм за счет снижения температуры подложки и (или) увеличения соотношения паровых потоков соль/металл.

На этой основе был предложен новый способ получения инкапсулированных в солевую матрицу порошковых материалов (чистых металлов, сплавов и соединений на их основе) с размерами частиц наноразмерного масштаба путем одновременного осаждения паровых фаз этих материалов и солей щелочных металлов на подложку при их одновременном испарении в вакуумной камере в случае перемешивания их паровых потоков в соотношении не ниже 0,5 и температуре подложки ниже температуры плавления соли и металла (получен патент Украины). Показано, что этот способ инкапсуляции частиц предотвращает их агломерацию и защищает от взаимодействия с атмосферой, что позволяет длительно хранить нанопорошки металлов без окисления.





**Никитенко Ю. А.** «Получение быстрозакаленных высокорекреационных и тугоплавких сплавов при индукционном и плазменно-дуговом плавлении». — Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 «Металлургия черных и цветных металлов и специальных сплавов» — Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, 2009. Дата защиты 4 ноября 2009 г.

Диссертация посвящена разработке технологий получения быстрозакаленных сплавов способами диспергирования при индукционной плавке в секционном кристаллизаторе и спиннингования при плазменно-дуговой плавке в водоохлаждаемом тигле. Рассмотрены теплофизические, физико-химические и материаловедческие основы исследуемых процессов.

Изучено тепловое состояние плавильных камер установок ИПСК и ПДП, определены основные теплонагруженные узлы, даны количественные характеристики тепловых потерь в отдельных узлах, определены коэффициенты эффективности переплава.

При индукционной плавке в секционном кристаллизаторе установлены технологические особенности формирования ванны расплава, обеспечивающие процесс диспергирования. Показано, что повышение частоты до 66 кГц обеспечивает максимальный объем ванны и значительное превышение купола расплава над кристаллизатором.

Установлено, что для обеспечения процесса диспергирования высота купола над секционным кристаллизатором должна составлять от 0,1 до 0,3  $D$  кристаллизатора. Превышение высоты купола вызывает пространственную нестабильность, а снижение его менее 0,1  $D$  приводит к попаданию чешуек на стенки кристаллизатора.

Изучение процесса плавки при плазменно-дуговом нагреве показало, что тепловой КПД плазмотрона составил 86...88 %, а эффективный КПД процесса — 44...45 %. Общая удельная мощность электроэнергии, затрачиваемая на процесс плавки, равняется 4...5 кВт·ч/кг. Установлено, что перегрев расплава в поверхностном слое относительно температуры металла возле сливной щели достигает примерно 700 °С. Также определен градиент по всей глубине ванны.

Исследование влияния мощности плазменной дуги на коэффициент слива показало, что наибольшее его значение 0,72 отмечено при мощности 40 кВт. Дальнейшее увеличение мощности не приводит к увеличению объема сливающегося металла, что объясняется перераспределением тепла в других элементах плавильной камеры, а часть остающегося расплава соответствует размерам гарнисажного слоя.

По результатам экспериментов установлена технологическая область значений влияния избыточного давления над расплавом и скорости вращения барабана, обеспечивающих получение качественных лент с аморфной структурой толщиной от 30 до 100 мкм.

Разработаны методика и приспособления для измерения температуры барабана-холодильника в процессе вращения и сверхбыстрой закалки расплава. С помощью методов математического моделирования определены закономерности теплового взаимодействия между расплавом и барабаном-холодильником при спиннинговании и сверхбыстрой закалке.

В результате моделирования установлено влияние на скорость закалки ленты (коэффициентов теплообмена между поверхностями лента-барабан, барабан-вода), внешний диаметр и толщину контактной стенки барабана. Модель показала хорошую сопоставимость результатов с экспериментальными данными.

Определены технологические параметры получения быстрозакаленных чешуек из сплавов Д16, ЭП648, Ni-Ti, BT1-0, Nd-Fe-B, RSR толщиной 15...50 мкм и лент Ni-Si-B, Cu-P, Fe-Cr-Ni-B толщиной 30...100 мкм.

На примере сплава Ni-Si-B с аморфной структурой изучено зарождение кристаллов и формирование кристаллической структуры в ленте при отжиге. Определено влияние температуры на размер зерна, количество аморфной и кристаллической фаз, основные соединения, образующиеся при отжиге.

Созданные оборудование и технологии рекомендованы для получения высокорекреационных и тугоплавких аморфных и микрокристаллических сплавов.



# КАЛЕНДАРЬ КОНФЕРЕНЦИЙ И ВЫСТАВОК НА 2010 г.

Дата	Место проведения	Название мероприятия	Организатор (контакты)
10–12.02	г. Набережные Челны, Россия	7-я Международная специализированная выставка «Машиностроение. Металлообработка. Металлургия. Сварка-2010»	ВЦ ЭКСПО-КАМА Тел.: +7(495) 223 35 57 E-mail: 5-5cbk.ru
23–26.03	г. Новосибирск, Россия	Специализированная промышленная выставка «Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Металлургия»	МВЦ «Сибирская ярмарка» Тел.: +7(495) 223 08 97 E-mail: info@1pointmsc.com
13–16.04	г. Киев, Украина	Выставка «Машиностроение. Металлургия. Металлообработка. Сварка»	ВЦ «КиевЭкспоПлаза» Тел./ факс: +38044 200 80 89(91) www.paton-expo.kiev.ua
14-15.04	г. Галле, Германия	Международная конференция «Лучевые технологии»	Тел.: +49 345 52 46 418 факс: +49 345 52 46 412 E-mail: tagungen@slv-halle.de
25–29.05	г. Киев, Украина	4-я Международная конференция «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов» (LTWMP-2009)	ИЭС, НТТУ «КПИ», МАС Тел./факс: (044) 529 26 23 www.iaw.com.ua
27–29.04	г. Екатеринбург, Россия	7-я Международная специализированная выставка Металлообработка. Урал / «UralMetalExpo 2010»	ВЦ КОСК «Россия» Тел.: +7(495) 921 44 07 E-mail: info@rte-expo.ru www.uralmetalexpo.ru
13–16.05	г. Донецк, Украина	Выставка «Машиностроение»	ЭкспоДонбасс, СВЦ (062) 381 21 36
16–19.05	г. Екатеринбург, Россия	VII Международная научно-техническая конференция «Ti–2010 в СНГ»	ЗАО «Межгосударственная ассоциация «Титан» Тел./факс: +7 (495) 788 32 82 www.titan-association/com
24–27.05	г. Москва, Россия	Международная выставка машин, оборудования, технологий и продукции металлургической промышленности	«ЭкспоЦентр», «Мессе Дюссельдорф ГмбХ» E-mail: info@messe-duesseldorf.de www.messe-duesseldorf.de
24–27.05	г. Москва, Россия	Международная специализированная выставка «Mashnex/Машиностроение»	МВЦ «Крокус Экспо» Тел.:+7 (495) 925 34 13, 982 50 69 E-mail: mashnex@mvm.ru
25–27.05	г. Киев, Украина	Международная конференция «Прочность металлов и конструкций при низких температурах»	Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины
25–28.05	г. Кацивели, Крым, Украина	Международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных технологиях»	ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины Тел.: (044) 271 26 33 факс: (044) 287 65 57 E-mail: journal@paton.kiev.ua
01–03.06	г. Киев, Украина	Промышленная выставка «ПатонЭкспо 2010»	ВЦ «КиевЭкспоПлаза» www.weldexpo.com.ua E-mail: olga@welding.kiev.ua
07–11.06	г. Ялта, Украина	Международная конференция «Композиционные материалы в промышленности»	Тел./факс: (044) 573 30 40 E-mail: office@conference.kiev.ua
08–10.06	г. Львов, Украина	Международная конференция «Проблемы коррозии и противокоррозионная защита конструкционных материалов»	Физико-механический ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины
12–15.10	г. Днепропетровск, Украина	Выставка «Машпром»	Экспоцентр «Метеор»
19–22.10	г. Ижевск, Россия	IX Международная специализированная выставка «Машиностроение. Металлургия. Металлообработка»	ФОЦ «Здоровье» Тел.: 8-922-693-11-77 www.vcudmurtia.ru /events/metal
23–26.11	г. Киев, Украина	IX Международный промышленный форум-2010. Международные специализированные выставки «Металлообработка» и «УкрМашТех»	ЗАО МВЦ Тел. (044) 201 11 57 (78) www.iec-expo.com.ua

**ПОДПИСКА – 2010 на журнал «Современная электрометаллургия»**

Стоимость подписки через редакцию*	Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
	120 грн	240 грн	700 руб.	1400 руб.	30 дол. США	60 дол. США

\*В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Если Вас заинтересовало наше предложение, заполните, пожалуйста, купон и отправьте заявку по факсу или электронной почте.

Телефоны и факсы редакции журнала «Современная электрометаллургия»:

тел.: (38044) 271-22-07, 529-26-23,

факс: (38044) 528-34-84, 528-04-86, 529-26-23.

Подписку на журнал «Современная электрометаллургия» (индекс 70693) можно оформить по каталогам подписных агентств «Пресса», «Идея», «Саммит», «Пресс-центр», KSS, «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).

**ПОДПИСНОЙ КУПОН**

Адрес для доставки журнала

Срок подписки с

201 г. по

201 г. включительно

Фамилия И. О.

Компания

Должность

Тел., факс, E-mail

**РЕКЛАМА в журнале «Современная электрометаллургия»****Полноцветная реклама****Обложка**

Первая страница обложки (190×190 мм) – 700 \$

Вторая страница обложки (200×290 мм) – 550 \$

Третья страница обложки (200×290 мм) – 500 \$

Четвертая страница обложки (200×290 мм) – 600 \$

**Вклейки после 2-й и перед 3-й страницами обложки**

Страница (200×190 мм) – 400 \$

**Внутренняя вклейка**

Разворот А3 (400×290 мм) – 570 \$

Страница (200×290 мм) – 340 \$

1/2 страницы (200×145 мм) – 170 \$

**Черно-белая реклама**

1 полоса (170×250 мм) – 80 \$

1/2 полосы (170×125 мм) – 50 \$

1/6 полосы (80×80 мм) – 15 \$

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу
- Статья на правах рекламы – 50 % стоимости рекламной площади
- Предусмотрена система скидок: при размещении рекламы в 2 номерах – 10 %; при размещении рекламы в 4 номерах – 20 %

**Технические требования к рекламным материалам**

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

**Все файлы в формате PC**

- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 5.0
- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

Подписано к печати 16.03.2010. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

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

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