

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор  
Б. Е. Патон

Ученые ИЭС им. Е. О. Патона

С. И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.),

В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),

Ю. С. Борисов, Г. М. Григоренко,

А. Т. Зельниченко, В. В. Кныш,

И. В. Кривцун, Ю. Н. Ланкин,

Л. М. Лобанов,

В. Д. Позняков, И. А. Рябцев,

К. А. Ющенко

Ученые университетов Украины

В. В. Дмитрик, НТУ «ХПИ», Харьков,

В. В. Квасницкий, НТУУ «КПИ», Киев,

В. Д. Кузнецов, НТУУ «КПИ», Киев,

М. М. Студент, ФМИ, Львов

Зарубежные ученые

Н. П. Алешин

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ

Гуань Цяо

Ин-т авиационных технологий, Пекин, Китай

А. С. Зубченко

ОКБ «Гидропресс», Подольск, РФ

М. Зиниград

Ун-т Иудеи и Самарии, Ариэль, Израиль

В. И. Лысак

Волгоградский гос. техн. ун-т, РФ

У. Райсген

Ин-т сварки и соединений, Аахен, Германия

Я. Пилярчик

Ин-т сварки, Гливице, Польша

О. И. Стеклов

РНТКО, Москва, РФ

Г. А. Турчин

С.-Петербургский гос. политехн. ун-т, РФ

Редакторы

Т. В. Юштина (отв. секр.), Н. А. Притула

Электронная верстка

И. Р. Наумова, А. И. Сулима, Д. И. Середа

Адрес редакции

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ

03680, Украина, Киев-150,

ул. Казимира Малевича, 11

Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277

Факс: (38044) 200 5484, 200 8277

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Учредители

Национальная академия наук Украины,

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ,

МА «Сварка» (издатель)

Свидетельство о государственной

регистрации KB 4788 от 09.01.2001

ISSN 0005-111X

Журнал входит в перечень утвержденных

Министерством образования и науки

Украины изданий для публикации трудов

соискателей ученых степеней

За содержание рекламных материалов  
редакция журнала ответственности не несет

Цена договорная

Издается ежемесячно

## СОДЕРЖАНИЕ

Интервью с президентом Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики В.А. Троицким ..... 3

### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

*Сидорец В.Н., Кривцун И.В., Демченко В.Ф., Крикент И.В., Коваленко Д.В., Коваленко И.В., Павлов А.Г.* Расчетное и экспериментальное исследование статических и динамических вольт-амперных характеристик аргоновой дуги с тугоплавким катодом ..... 7

*Ющенко К.А., Маркашова Л.И., Звягинцева А.В., Хохлова Ю.А., Кушнарева О.С., Червяков Н.О.* Особенности микроструктуры многослойных швов с различной чувствительностью к образованию горячих трещин ..... 14

*Дзиньхуа Яо, Коваленко В.С.* Исследование новой технологии сверхзвукового лазерного напыления ..... 19

*Скульский В.Ю., Жуков В.В., Нимко М.А., Моравецкий С.И., Мищенко Л.Д.* Оценка склонности к отпускной хрупкости теплоустойчивых сталей с помощью высокотемпературных испытаний ..... 28

### ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

*Пилярчик Я.* Деятельность Института сварки в Гливицах в области подготовки кадров для сварочного производства ..... 34

*Гречанюк Н.И., Гречанюк В.Г., Хоменко Е.В., Гречанюк И.Н., Затовский В.Г.* Современные композиционные материалы для коммутационной и сварочной техники.

Сообщение 2. Применение методов высокоскоростного испарения в вакууме для изготовления электрических контактов и электродов ..... 41

*Гончаров И.А., Файнберг Л.И., Рыбаков А.А., Нетяга А.В.* Анализ возможности применения шлаковой корки в производстве агломерированных флюсов ..... 48

*Лютый А.П.* Покорение танковой брони ..... 54

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Диссертации на соискание ученой степени ..... 58

### Информация

Сварка бойлеров с использованием высокопроизводительного процесса CMT Twin ..... 61

### ХРОНИКА

Открытие мемориальной доски ..... 63

Отчетная конференция по программе «Ресурс» ..... 64

Памяти В.Ф. Хорунова ..... 67

## EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief  
B. E. Paton

Scientists of PWI, Kyiv

**S. I. Kuchuk-Yatsenko** (vice-chief ed.),  
**V. N. Lipodaev** (vice-chief ed.),  
**Yu. S. Borisov, G. M. Grigorenko,**  
**A. T. Zelnichenko, V. V. Knysh,**  
**I. V. Krivtsun, Yu. N. Lankin,**  
**L. M. Lobanov,**  
**V. D. Poznyakov, I. A. Ryabtsev,**  
**K. A. Yushchenko**

Scientists of Ukrainian Universities

**V. V. Dmitrik**, NTU «KhPI», Kharkov,  
**V. V. Kvasnitskii**, NTUU «KPI», Kyiv,  
**V. D. Kuznetsov**, NTUU «KPI», Kyiv,  
**M. M. Student**, Karpenko PhMI, Lviv

Foreign Scientists

**N. P. Alyoshin**

N.E. Bauman MSTU, Moscow, Russia

**Guan Qiao**

Beijing Aeronautical Institute, China

**A. S. Zubchenko**

OKB«Gidropress», Podolsk, Russia

**M. Zinigrad**

College of Judea & Samaria, Ariel, Israel

**V. I. Lysak**

Volgograd State Technical University, Russia

**Ya. Pilarczyk**

Welding Institute, Gliwice, Poland

**U. Reisgen**

Welding and Joining Institute, Aachen, Germany

**O. I. Stekolov**

Welding Society, Moscow, Russia

**G. A. Turichin**

St. Petersburg State Polytechn. Univ., Russia

Editors

**T. V. Yushtina** (exec. secr.), N. A. Pritula  
Electron galley

**I. R. Naumova, A. I. Sulima, D. I. Sereda**

Address of Editorial Board:

11, Kazimira Malevicha str., 03680, Kyiv,  
Ukraine

Tel.: (38044) 200 63 02, 200 82 77

Fax: (38044) 200 54 84, 200 82 77

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Founders

National Academy of Sciences of Ukraine,  
Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine,  
IA «Welding» (Publisher)

State Registration Certificate

KV 4788 of 09.01.2001

ISSN 0005-111X

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

Published monthly

Journal «*Avtomaticheskaya Svarka*»  
is published in English under the title  
«*The Paton Welding Journal*»  
Concerning publication of articles,  
subscription and advertising, please,  
contact the editorial board.

## CONTENTS

Interview with V.A. Troitsky, the president of the Ukrainian  
Society of NDT and Technical Diagnostics ..... 3

## SCIENTIFIC AND TECHNICAL

**Sidorets V.N., Krivtsun I.V., Demchenko V.F., Krikent I.V.,**  
**Kovalenko D.V., Kovalenko I.V., Pavlov A.G.** Calculated and  
experimental investigation of static and dynamic volt-ampere  
characteristics of argon arc with a refractory cathode ..... 7

**Yushchenko K.A., Markashova L.I., Zvyagintseva A.V. Khokhlova**  
**Yu.A., Kushnareva O.S., Chervyakov N.O.** Peculiarities of  
microstructure of multilayer welds with different susceptibility  
to hot cracking ..... 14

**Jianhua Yao, Kovalenko V.S.** Investigation of new technology  
of supersonic laser spraying ..... 19

**Skulsky V.Yu., Zhukov V.V. Numko M.A. Moravetsky S.I.,**  
**Mishchenko L.D.** Evaluation of heat-resistant steels tendency  
to tempering brittleness by using high-temperature tests ..... 28

## INDUSTRIAL

**Pilyarchik J.** Activity of Institute of Welding in Gliwice in the  
field of preparation of personnel for welding production ..... 34

**Grechanyuk N.I., Grechanyuk V.G., Khomenko E.V., Grecha-**  
**nyuk I.N., Zatovsky V.G.** Modern composite materials for  
commutation and welding engineering. Information 2.  
Application of methods of high-speed evaporation in vacuum  
for manufacture of electric contacts and electrodes ..... 41

**Goncharov I.A., Fainberg L.I., Rybakov A.A., Netyaga A.V.**  
Analysis of possibility of slag crust application in production  
of agglomerated fluxes ..... 48

**Lyutyi A.P.** Conquest of tank armor ..... 54

## BRIEF INFORMATION

Theses for scientific degree ..... 58

## Information

Welding of boilers by using highly-efficient process CMT Twin ..... 61

## NEWS

Reporting conference on program "Resource" ..... 63

Opening of the memorial plaque ..... 64

In memory of V.F. Khorunov ..... 67

## Интервью с президентом Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики В.А. Троицким

*Владимир Александрович Троицкий — доктор технических наук, заведующий отделом неразрушающих методов контроля качества сварных соединений ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, профессор, лауреат Премии СМ СССР, Государственной премии Украины, член многих обществ НКТД зарубежных стран, академик Международной академии НК, член ряда научных советов. Автор около 700 научных работ. Подготовил 12 кандидатов наук.*

*К 80-летию со дня рождения В.А. Троицкого редакция журнала взяла у юбиляра интервью.*



**Владимир Александрович, расскажите, пожалуйста, о профессии, которой Вы посвятили свою жизнь.**

Я занимаюсь физическими методами контроля качества с 1976 г., т.е. ровно 40 лет. Но это только половина моей жизни, ведь мне исполнилось 80. Оценка качества без разрушения объекта, который вас интересует, не повреждая его целостности, — это искусство, подобное тому, как врач, не проводя операции, только на основании результатов диагностических исследований может указать на тромб в вене, каверну в легких или смещение позвонков у человека. Применяя физические методы диагностирования с использованием очень небольших энергий, можно визуализировать внутренние органы человека, состояние сосудов головного мозга и их зашлакованность. Я специально использую знакомую всем медицин-

скую терминологию, касающуюся тела человека. Это понятнее, чем термины «нераскрытые трещины», «несплавления», «непровары», «мелкие поры», «слипания», «зернистость», «межкристаллитная коррозия» и тому подобные несовершенства в сварных соединениях, металлопрокате, отливках и прочих продуктах промышленного производства, объектах производства. Мы сотрудничаем с медицинскими учреждениями, и, также как медики что-то заимствуют у нас, мы заимствуем у них. Разница состоит в том, что диагностика твердого тела, кристаллической структуры требует более высокой чувствительности и точности. Чтобы находить трещины с раскрытием менее 0,1 мм, нужны приборы с высоким разрешением, т.е. необходимо различать до 10...15 пар линий в пределах одного миллиметра. Сейчас мы уже можем различать до 20 пар линий на 1 мм, ширина которых составляет менее 30 микрон (0,03 мм). Естественно, в живых тканях фиксировать такие отклонения от нормы нет необходимости, а в сварных соединениях — обязательно. В швах есть такие нарушения, как матовые и черные пятна, слипания и др., т.е. зоны, которые имеют другое зерно. Они не имеют объема, но это дефекты, которые могут превратиться в трещины через некоторое время. Мы располагаем технологиями, которые могут выявлять такие отклонения от нормы. Другое дело — кому это надо? Обычно заказчику это надо, а сварщику — нет. Первый нас просит все проверять хорошо, никакие дефекты его не устраивают. А производители металлоконструкций, сооружений на этот счет имеют другое мнение. Ответственность обычно делят на троих — заказчик, дефектоскопист, изготовитель.

**Какие этапы научного «взросления» Вы прошли?**

Это трудно перечислить. Первое мое авторское свидетельство я получил в 1956 г., когда был на третьем курсе. Закончил я Московский институт инженеров железнодорожного транспорта, имея 5 авторских свидетельства и 4 научных статьи. Все они касались различных тем в направлении электротехники. Но всерьез я заинтересовался одной темой — применением магнитодиэлектриков в низкочастотной технике для увеличения удельной мощности и совершенствования технологии изготовления электрических машин. Через три года после окончания электротехнического факультета я на эту тему защитил кандидатскую дис-





Низкочастотный дальнедействующий УЗК без сканирования поверхности протяженного (до 500 м) объекта

ученых и специалистов, включая Б.Е. Патона, А.Е. Асниса, С.Л. Мандельберга и других не допускали совмещения мной двух профессий. Приходилось сложно. Бросать десятилетние заделы было нельзя, поэтому сварочной электродинамикой (переходные процессы, резонансные явления, особые формы кривых тока и напряжений, управления и т.п.) я перестал заниматься в 1980-х годах. Должен отметить, что с тех пор прошло более 30 лет, но многие из моих электротехнических работ актуальны и до сих пор. Однако дефектоскопия — это необъятное поле деятельности. В области НК за 40 лет было получено много различных технических решений в сфере диагностики ответственных промышленных объектов. Я, в конечном счете, состоялся как специалист именно в этой области, знаю практически всех ведущих дефектоскопистов планеты, имею публикации в ведущих журналах мира. На Ваш вопрос отвечаю: нет, я не жалею, что выбрал это направление.

**Владимир Александрович, назовите Ваши наиболее важные достижения в дефектоскопии.**

Дефектоскопическая техника, как и все в этом мире, изменчива. Проходит время, уходят в прошлое технические решения, идеи, люди. Поэтому вечными являются только фундаментальные, неподвластные времени идеи, решения. Действительно, за 40 лет деятельности в направлении дефектоскопии удалось кое-что сделать. Я перешел на это направление в са-

сертацию. Я жил в городе, в котором не было машиностроительных заводов, но были предприятия по ремонту сварочной техники. Так я познакомился с задачами создания сварочных источников тока, которые должны обеспечить плавное регулирование режимов. Сварщик должен иметь возможность изменять ток в четырехкратном размере, допустим от 50 до 200 А. Для этого конструкция сварочных трансформаторов предусматривает перемещение обмоток или задвигание между ними шунтов. И это обстоятельство определяет их габариты. Я сделал сварочный трансформатор тех же габаритов, но с удвоенным диапазоном плавного регулирования. Были у меня и другие работы, на которые обратил внимание чл.-корр. АН УССР В.К. Лебедев, начальник электротехнического отдела Института электро-сварки им. Е.О. Патона. Он и пригласил меня работать в Киев в отдел, которым до него руководил Б.Е. Патон. Коллектив отдела был очень профессиональным и в этой научной среде я работал над решением различных вопросов сварочной электродинамики.

В 1973 г. я защитил докторскую диссертацию. Таким образом, дефектоскопия — это мое уже третье научное направление. Первое — электротехническое материаловедение, второе — сварочная электродинамика и источники питания, разные, не только сварочные.

**Не жалеете, что сегодня Вы всецело посвятили себя проблемам дефектоскопии?**

Первые пять-шесть лет действительно было очень сложно. Громадный задел электротехнических работ, разработок по источникам тока нельзя было сразу бросить. Многие заводы производили или начинали производство источников питания в разных городах страны. Вместе с тем проблемы стройки века — гордости черной металлургии Харцызского трубного завода, а также советы крупных

мый ответственный момент завершения строительства ХТЗ и начала производства труб большого диаметра для газопроводов высокого давления. Все эти 40 лет наш коллектив совершенствует технологию, оборудование и сложную систему многократного НК с применением разных физических методов при производстве труб. Из нашего конструкторского отдела сформировалась частная фирма по автоматизированному ультразвуковому контролю, которую возглавляет сейчас бывший наш сотрудник В.Л. Найда. Основная программа контроля изготавливаемых труб для магистральных газопроводов проводится на наших установках НК-205, созданных нами задолго до появления этой частной фирмы. Функциональные возможности НК-205 мы постоянно совершенствуем, как и другие средства НК, используемые в этом производстве и основанные на радиационном излучении, а также ручные, магнитные, визуально-измерительные средства. Служба НК ЦЗЛ этого завода насчитывает десятки специалистов, которые регулярно проходят аттестацию и сертификацию в нашем отделе. Разработанная нами и постоянно совершенствуемая система НК обеспечивает высокую надежность магистральных газопроводов. Пока не было разрушений продольных заводских швов, которые мы проверяли. Все аварии на магистральных газопроводах инициируются кольцевыми, монтажными швами. Наша система НК сейчас воспроизводится на трубопрокатных заводах России, Болгарии и других стран. В этом есть огромная заслуга Бориса Евгеньевича Патона, под руководством которого мы развиваем это направление.

Сорок лет назад в СССР не было профессии «инженер-дефектоскопист». Все наши разработки по радиационным, магнитным, акустическим и другим методам контроля подпадали под сферу деятельности Отделения физики и астрономии АН СССР. Чл.-корр. М.М. Михеев, директор Института физики металлов УрО РАН, организовал в 1965 г. выпуск журнала «Дефектоскопия», который до сих пор является основным академическим изданием России по этой тематике. Приборы для дефектоскопии разрабатывали и выпускали НИИ и заводы Минприбора, которых, к сожалению, на территории Украины не было. Так было до тех пор, пока наведением порядка не занялся Борис Евгеньевич Патон.

Опуская подробности, могу сообщить, что тема ТДНК в стране стала государственной. Несколько кафедр технических университетов сейчас ведут подготовку будущих дефектоскопистов, введены различного рода специализации на машиностроительных, металлургических, сварочных кафедрах. В этом направлении была проделана колоссальная организационная работа.

Бесспорной заслугой возглавляемого мной коллектива является создание Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики (УОНКТД) по европейским стандартам, которые мы освоили в процессе деловых контактов с аналогичными европейскими обществами. УОНКТД, являясь одним из фундаторов Европейской федерации EFNDT и Всемирного конгресса ICNDT принимает участие во всех мероприятиях, которые проводят эти международные организации. УОНКТД самостоятельно издает бюллетень «НК-Информ»,

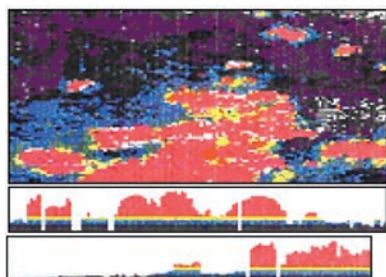


Устройства для разнонаправленного подвижного локального намагничивания металлоконструкций при поиске в них трещин

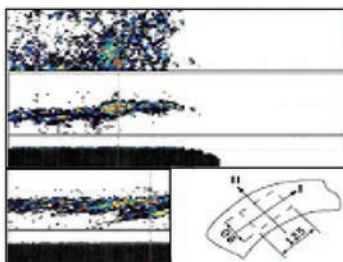


Флэш-радиография без промежуточных носителей информации

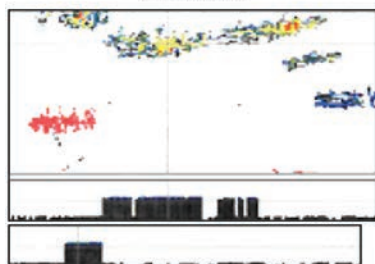




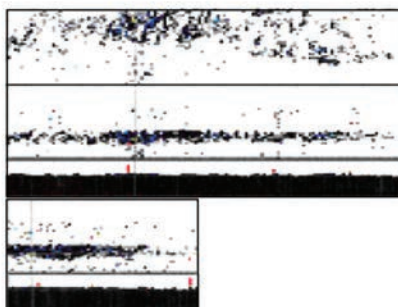
Остаточная толщина металла сосуда с внутренним коррозионным поражением



Распределение сигналов при наличии коррозионного проразжения внутри металла (гиба паропровода)



Вид сверху, сбоку и с торца для металла с расслоениями



Распределение УЗ-сигналов питтинговой коррозии внутри металла, каждый отдельный дефект допустим, а металлоконструкция снята с эксплуатации

Визуализация несплошности, обратной (недоступной) стороны объекта и расслоения металла

TK-135 — всемирной организации по стандартизации ISO. Украина, после долгих мытарств среди ГОСТов, DIN, EN и других систем стандартизации, остановилась на ISO. В 2014 г. к нам приезжал председатель TK-135, профессор Н. Hatana, с которым у нас сложились хорошие деловые отношения. По его просьбе мною было опубликовано в японском журнале JSNI две статьи об УОНКТД и о новом направлении магнитной дефектоскопии.

**Вы перечислили важные организационные моменты, направленные на развитие Вашей профессии в Украине. А какие научные идеи и технические решения по дефектоскопии занимают Вас в настоящее время?**

Основные мои идеи и технические решения изложены примерно в 700-х опубликованных работах, среди которых 153 патента и авторских свидетельства. Я не могу объективно оценить, какая часть этих публикаций наиболее ценная. Могу отметить, во что я сейчас верю, над чем работаю. Это, пожалуй, четыре научных направления:

- низкочастотный дальнедействующий УЗК без сканирования поверхности протяженного (до 500 м) объекта;
- разнонаправленное подвижное локальное намагничивание металлоконструкций при поиске в них трещин;
- радиография без промежуточных носителей информации (пленок, п/п пластин) с чувствительностью и производительностью на порядок выше, чем было до сих пор;
- цифровые методы обработки УЗ-информации — визуализация толщинометрии, рельефа обратной (недоступной) для контроля стороны металлоконструкции.

Можете мне поверить, что последние годы своей жизни я не буду тратить на второстепенные вопросы. Каждое из этих четырех направлений является фундаментальным. Это плохо понимают в сварочном сообществе, где мне приходится работать, но очень ценят эти идеи в мире НК. Достаточно сказать, что на эти темы я публикую работы в профессиональных журналах США, Англии, Японии. В этих странах самый высокий уровень НК и высокие требования в нашей профессии.

**Благодарим Вас, Владимир Александрович, за интересное и обстоятельное освещение проблем и желаем Вам крепкого здоровья и новых достижений на благо Украины.**

распространяемый бесплатно среди членов УОНКТД (это издание очень популярно среди специалистов по НК), а также поддерживает издание журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль».

Не последнюю роль я сыграл в создании международной Академии наук NDT со штаб-квартирой в г. Брешиа (Италия). Членами этой академии являются выдающиеся ученые, среди которых четыре лауреата Нобелевской премии, четыре академика НАН Украины во главе с Б.Е. Патеном. Сессии, пленарные заседания IANDT проходят параллельно с мероприятиями, проводимыми EFNDT и ICNDT.

Также я активно работаю в

УДК 621.791.75:621.3.014.33

# РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АРГОНОВОЙ ДУГИ С ТУГОПЛАВКИМ КАТОДОМ\*

**В.Н. СИДОРЕЦ, И.В. КРИВЦУН, В.Ф. ДЕМЧЕНКО, И.В. КРИКЕНТ, Д.В. КОВАЛЕНКО,  
И.В. КОВАЛЕНКО, А.Г. ПАВЛОВ**

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Для обоснованного выбора оптимальных режимов импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом необходимо исследовать динамику горения импульсной дуги. Предложенная ранее модель нестационарной дуги с распределенными параметрами из-за больших вычислительных затрат позволяет рассмотреть воздействие на дугу лишь единичного импульса тока, тогда как практический интерес представляет исследование динамических характеристик дуги при подаче пачек высокочастотных импульсов сварочного тока. В связи с этим представляет интерес разработка динамической модели дуги с сосредоточенными параметрами, которая не имеет ограничений с точки зрения объема вычислений и позволит с достаточной точностью проследить динамику изменения характеристик дуги с тугоплавким катодом при высокочастотной модуляции тока. Для сравнения эти же данные были получены расчетным методом на основе модели с распределенными параметрами. Постоянная времени столба дуги определялась исходя из расчетных данных динамики изменения напряжения на дуге, полученных при помощи модели с распределенными параметрами. В совокупности проведенный комплекс расчетных и экспериментальных исследований позволил отработать алгоритм использования модели с сосредоточенными параметрами и идентифицировать их. Приведены результаты экспериментальных исследований динамики изменения тока и напряжения дуги при высокочастотной импульсно-дуговой сварке неплавящимся электродом, которые сопоставляются с результатами расчета по модели с сосредоточенными параметрами. Библиогр. 14, табл. 1, рис. 8.

*Ключевые слова:* импульсно-дуговая сварка, сварка неплавящимся электродом, высокочастотные импульсы, динамические характеристики дуги, нестационарная дуга, столб дуги, аргонная дуга, тугоплавкий катод

Сварка неплавящимся электродом в среде инертных газов (ТИГ-процесс) широко применяется при изготовлении ответственных конструкций в атомном и химическом машиностроении, авиа- и ракетостроении, пищевой и других отраслях промышленности. Недостатком ТИГ-сварки является низкая производительность, обусловленная недостаточной проплавляющей способностью дуги при данном способе сварки. Для устранения этого недостатка в настоящее время используются различные способы активации процессов переноса энергии в дуговой плазме и сварочной ванне, такие как: сварка по слою активирующего флюса (процесс А-ТИГ), гибридная сварка (ТИГ + лазер) и др. [1–4]. В работе [5] методом математического моделирования дуги с тугоплавким катодом установлено, что при подаче импульса сварочного тока с высокой скоростью его изменения на переднем фронте импульса наблюдается эффект существенного повышения плотности тока и плотности теплового потока на аноде по сравнению с соответствующими характеристиками стационарной дуги. Технологическим

следствием, которое можно ожидать в результате интенсификации теплового и динамического воздействия импульсной дуги на расплав, может быть повышение глубины проплавления и увеличение объема расплавленного металла по сравнению со сваркой на постоянном токе.

Отмеченная особенность динамики горения дуги в импульсном режиме свидетельствует о том, что при соответствующем выборе параметров режима высокочастотная модуляция сварочного тока может выступать в качестве еще одного средства активации процессов переноса энергии в дуговой плазме и свариваемом металле. Это обуславливает интерес к дальнейшим исследованиям динамических характеристик дуги с тугоплавким катодом при сварке в импульсном режиме. Первичным инструментом, который широко используется при анализе сварочной дуги, является ее вольт-амперная характеристика (ВАХ). Исследование связи между током и напряжением при сварке неплавящимся электродом представляет интерес как в случае сварки на постоянном токе, так и в случае

\* По материалам доклада, представленного на VII Международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», 15–19 сентября 2014, г. Одесса, Украина.

высокочастотной импульсной модуляции тока, при которой проявляются описанные выше динамические эффекты. Настоящая работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию статических и динамических ВАХ аргоновой дуги с тугоплавким катодом.

Модель нестационарной дуги, предложенная в работе [6] и реализованная в работе [5], базируется на описании процессов энерго-, массо- и электропереноса в плазме столба и анодной области нестационарной дуги с тугоплавким катодом (модель с распределенными параметрами). Такой подход требует значительных вычислительных ресурсов для расчета тепловых, электромагнитных и газодинамических характеристик дуговой плазмы, что ограничивает область применения модели рассмотрением лишь одиночных импульсов тока. В то же время практический интерес представляет изучение влияния пачек импульсов различной формы и частоты.

**1. Основные определения.** При определении вольт-амперной характеристики электрической дуги устанавливается связь между током  $I$  и напряжением  $U$  на дуге. Как известно, напряжение на дуге является суммой трех составляющих: катодного падения потенциала  $U_c$ , напряжения на столбе дуги  $U_p$  и анодного падения потенциала  $U_a$ , которое для большинства электрических дуг атмосферного давления, в т.ч. для сварочных дуг, отрицательно [7]. Поскольку потенциалы на поверхности металлического катода и анода можно с достаточной точностью считать постоянными (из-за высокой электрической проводимости металлов), полное напряжение на дуге  $U$  можно определять (измерять) как разность потенциалов поверхности анода и катода, т.е. полагать  $U = \phi_a - \phi_c$ , где  $\phi_a$ ,  $\phi_c$  — потенциалы рабочих поверхностей анода и катода соответственно. Однако такое общепринятое определение напряжения, как интегральной электрической характеристики дугового разряда, не годится для определения его составляющих, а именно катодного  $U_c$  и анодного  $U_a$  падений потенциала, а также напряжения на столбе дуги  $U_p$ . Это обусловлено тем обстоятельством, что согласно расчетам характеристик плазмы аргоновой дуги с тугоплавким катодом и водоохлаждаемым [8] или испаряющимся [9] анодом, а особенно дуги при гибридной (ТИГ + CO<sub>2</sub>-лазер) сварке [10], потенциал плазмы на границе анодного слоя  $\phi_{ap}$ , равно как и потенциал плазмы на границе катодного слоя  $\phi_{cp}$ , оказываются переменными вдоль границ  $\Gamma_{ap}$  и  $\Gamma_{cp}$ , разделяющих анодную и катодную области со столбом дуги, т.е. указанные границы не являются эквипотенциальными.

Для определения эффективных (интегральных) значений анодного падения потенциала  $\langle U_a \rangle$ , ко-

торое в сумме с определенными соответствующим образом значениями катодного падения  $\langle U_c \rangle$  и напряжения на столбе  $\langle U_p \rangle$  должно давать полное напряжение на дуге  $U = \langle U_c \rangle + \langle U_p \rangle + \langle U_a \rangle$ , поступим следующим образом. Поскольку плотность электрического тока в столбе дуги определяется выражением  $\vec{j} = -\sigma \text{grad} \phi$ , где  $\sigma$  — электропроводность,  $\phi$  — потенциал электрического поля в плазме столба дуги, из уравнения неразрывности  $\text{div} \vec{j} = 0$  вытекает следующее интегральное соотношение

$$\int_{\Omega} \frac{|\vec{j}|^2}{\sigma} dV = - \int_{\Gamma} \phi j_n dS, \quad (1)$$

где  $\Omega$  — область, занимаемая плазмой столба дуги;  $\Gamma$  — ее граница;  $j_n$  — проекция вектора плотности тока на внешнюю нормаль  $\vec{n}$  к границе  $\Gamma$ . Представим границу  $\Gamma$  в виде:  $\Gamma = \Gamma_{ap} + \Gamma_{cp} + \Gamma_{bp}$ , где  $\Gamma_{bp}$  — часть границы  $\Gamma$ , через которую не протекает ток ( $j_n|_{\Gamma_{bp}} = 0$ ). Тогда из (1) получим

$$\int_{\Omega} \frac{|\vec{j}|^2}{\sigma} dV = \int_{\Gamma_{ap}} \phi j_{n'} d\Gamma_{ap} - \int_{\Gamma_{cp}} \phi j_n d\Gamma_{cp}, \quad (2)$$

где  $\vec{n}' = -\vec{n}$ . Выражение в левой части (2) есть тепловая мощность, выделяющаяся в столбе дуги. В соответствии с интегральным законом Джоуля–Ленца запишем:

$$\int_{\Omega} \frac{|\vec{j}|^2}{\sigma} dV = I \cdot \langle U_p \rangle,$$

где под

$$\langle U_p \rangle = \frac{1}{I} \int_{\Omega} \frac{|\vec{j}|^2}{\sigma} dV$$

будем понимать эффективное падение напряжения на столбе дуги. Так как поверхности  $\Gamma_{ap}$  и  $\Gamma_{cp}$  не являются эквипотенциальными, введем для них понятия эффективных значений потенциалов  $\Phi_{ap}$  и  $\Phi_{cp}$  следующим образом:

$$\Phi_{ap} = \frac{1}{I} \int_{\Gamma_{ap}} \phi j_{n'} d\Gamma_{ap}; \quad \Phi_{cp} = \frac{1}{I} \int_{\Gamma_{cp}} \phi j_n d\Gamma_{cp}. \quad (3)$$

Тогда из (2) падение напряжения на столбе дуги можно определить как разность эффективных значений потенциалов  $\Phi_{ap}$  и  $\Phi_{cp}$ , т.е. положить  $\langle U_p \rangle = \Phi_{ap} - \Phi_{cp}$ . Воспользовавшись (3), определим эффективные анодное  $\langle U_a \rangle$  и катодное  $\langle U_c \rangle$  падения в виде:

$$\langle U_a \rangle = \phi_a - \Phi_{ap}; \quad \langle U_c \rangle = \Phi_{cp} - \phi_c.$$

В рамках данных определений можно получить стандартное выражение для напряжения на дуге в виде суммы падений напряжений на отдельных участках дугового разряда:



$$U = \langle U_c \rangle + \langle U_p \rangle + \langle U_a \rangle = \varphi_a - \varphi_c, \quad (4)$$

где следует принимать во внимание тот факт, что эффективное анодное падение напряжения является отрицательным.

**2. Статические вольт-амперные характеристики аргоновой дуги с тугоплавким катодом.** Рассмотрим результаты экспериментальных измерений статической ВАХ дуг длиной  $l = 1,5$  и  $3,0$  мм, горящих на медный водоохлаждаемый анод. На рис. 1 в виде отдельных маркеров приведены экспериментальные данные, штриховыми линиями показаны аппроксимации этих данных рядом Лорана, коэффициенты которого представлены в таблице:

$$U(I) = \sum_{j=1}^{j=1} a_j \left( \frac{I}{100} \right)^j, \quad (5)$$

где  $U$  [В];  $I$  [А].

Для теоретической оценки составляющих напряжения на дуге, входящих в формулу (4), воспользуемся результатами расчетов [8] распределенных характеристик стационарной дуги длиной  $3,0$  мм, выполненных в диапазоне токов  $I = 50 \dots 250$  А, на основе модели работы [6]. На рис. 2 кривыми с маркерами представлены зависимости от тока дуги анодного падения потенциала  $\langle U_a \rangle$  и суммарного напряжения на столбе и анодной области дуги  $\langle U_{pa} \rangle = \langle U_p \rangle + \langle U_a \rangle$ , вычисленных по разнице эффективных (интегральных) значений потенциалов на соответствующих поверхностях. На этом же рисунке кривыми без маркеров показаны падения напряжения  $U_{a0}$ ,  $U_{pa0} = U_{p0} + U_{a0}$ , определенные как разности осевых значений соответствующих потенциалов. Как следует из представленных кривых, погрешность в определении напряжения на столбе дуги и падения потенциала в анодном слое двумя рассмотренными способами составляет величину порядка  $10\%$ , тем не менее, при проведении дальнейшего анализа будем использовать введенные в первом разделе данной статьи эффективные значения, при записи которых знак усреднения  $\langle \rangle$  будем опускать.

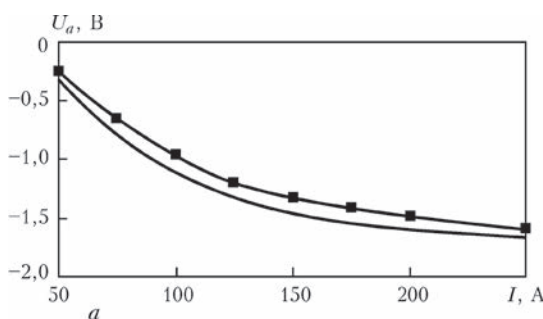


Рис. 2. Расчетные зависимости анодного падения потенциала (а) и суммарного напряжения на столбе и анодной области (б) от тока дуги, полученные с использованием модели стационарной дуги с распределенными параметрами

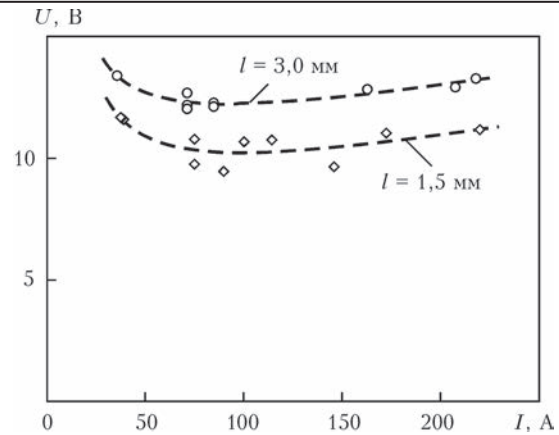


Рис. 1. Экспериментальные данные и аппроксимации статических ВАХ аргоновой дуги длиной  $1,5$  и  $3,0$  мм с тугоплавким катодом и медным водоохлаждаемым анодом

#### Коэффициенты аппроксимации

Длина дуги $l$ , мм		1,5	3,0
Коэффициенты аппроксимации	$a_{-1}$	1,394283	1,113619
	$a_0$	7,343352	9,765307
	$a_1$	1,443792	1,333032

В модели [6] в явном виде не рассматривается катодная область дуги, поэтому теоретически оценить величину катодного падения потенциала по данным расчетов, выполненных в работе [8], не представляется возможным.

Для нахождения  $U_c$  воспользуемся экспериментальными данными (см. рис. 1) и вычислим катодное падение напряжения как разность между экспериментально определенной величиной  $U$  и рассчитанным эффективным напряжением на столбе и анодной области дуги  $U_{pa} = U_p + U_a$ , приведенными на рис. 3. Определенное таким образом изменение эффективного катодного падения  $U_c$  от тока дуги показано на рис. 4. На этом же рисунке представлены расчетные данные о величине катодного падения напряжения, полученные в докладе [8], исходя из приближенной модели катодного слоя. Сравнение этих результатов указывает на качественно аналогичный характер зависимости катодного падения от тока, хотя данные и отличаются на величину порядка  $1,3$  В. Полученные таким образом расчетно-экспериментальные данные о зависимости  $U_c(I)$  (кривая 2 на рис. 4) будут

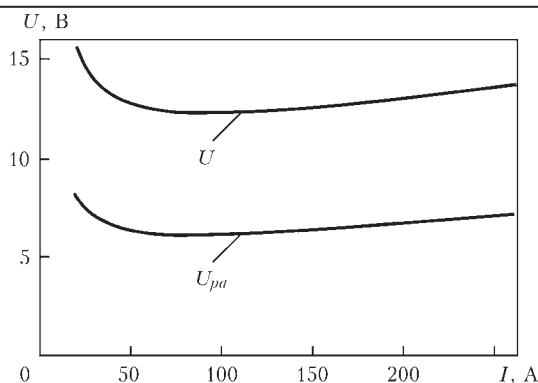


Рис. 3. Зависимость полного напряжения на дуге  $U$  (эксперимент) и суммарного эффективного напряжения на столбе и анодной области дуги  $U_{pa}$  (расчет) от тока

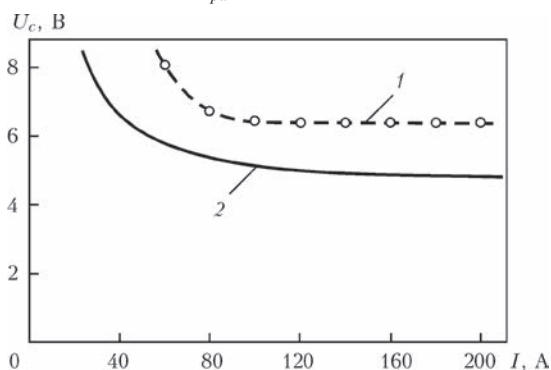


Рис. 4. Зависимость катодного падения напряжения от тока дуги: 1 — по данным работы [11]; 2 — расчет в соответствии с данными, приведенными на рис. 3

использоваться для определения динамической ВАХ импульсной дуги.

**3. Динамическая модель дуги с сосредоточенными параметрами.** В качестве альтернативы модели нестационарной дуги с распределенными параметрами [5, 6] сформулируем уравнения динамической модели дуги с сосредоточенными параметрами, которые допускают аналитическое решение, не связанное с громоздкими вычислениями.

В рамках данной модели столб дуги рассматривается как некий объект, который подчиняется закону сохранения энергии [12]

$$\frac{dQ}{dt} = P - P_\theta, \quad (6)$$

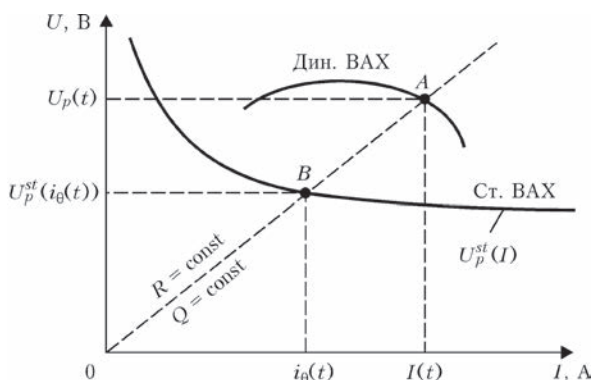


Рис. 5. Определение падения напряжения на столбе дуги в динамике с использованием понятия тока состояния дуги  $i_\theta$

где  $Q$  — внутренняя энергия столба дуги;  $P, P_\theta$  — подводимая и отводимая мощности, соответственно. Используя в качестве исходных данных статическую вольтамперную характеристику столба дуги  $U_p^{st}(I)$  и соответствующую постоянную времени  $\theta$ , эта модель описывает динамику дуги при любом изменении тока  $I(t)$

$$U_p(t) = \frac{U_p^{st}(i_\theta(t))}{i_\theta(t)} I(t). \quad (7)$$

В формуле (7) используется понятие тока состояния  $i_\theta$ , которое иллюстрируется с помощью рис. 5. Каждой точке динамической ВАХ столба дуги с координатами  $(U_p, I)$  соответствует только одна точка статической ВАХ с координатами  $(U_p^{st}(i_\theta), i_\theta)$ , причем внутренняя энергия  $Q$  (и сопротивление  $R$ ) столба дуги в статическом и динамическом состояниях равны.

Формула (7) входит в уравнения, которые соответствуют законам Кирхгофа, описывающим электрическую цепь. Эти уравнения дополняются уравнением динамической модели столба дуги, которое является электротехническим аналогом [12] уравнения (6)

$$\theta \frac{di_\theta^2}{dt} + i_\theta^2 = I^2. \quad (8)$$

Отметим, что статическую вольтамперную характеристику столба дуги можно как измерять экспериментально, так и рассчитывать теоретически, например, с помощью модели с распределенными параметрами.

Полное напряжение на дуге определяли по формуле

$$U(I) = \frac{U_p^{st}(i_\theta)}{i_\theta} I + U_c(I) + U_a(I), \quad (9)$$

где  $U_a(I)$  — эффективное анодное падение потенциала, которое может быть определено с помощью модели с распределенными параметрами;  $U_c(I)$  — эффективное катодное падение потенциала, которое может быть определено по предложенной расчетно-экспериментальной методике. Таким образом, в рамках динамической модели дуги падение напряжения на нестационарной дуге рассчитывается как функция текущей величины тока в импульсе. При этом в качестве априори заданных параметров динамической модели дуги с сосредоточенными параметрами используются данные о зависимости анодного и катодного падений потенциала от тока, полученные экспериментально или с помощью модели с распределенными параметрами.

**4. Динамические вольт-амперные характеристики аргоновой дуги с тугоплавким катодом.** Алгоритм применения модели с со-

средоточенными параметрами требует ее предварительной калибровки, а именно определения постоянной времени  $\theta$ . Для этого необходимо выбрать какой-нибудь динамический режим горения дуги, который описывается обеими моделями и сравнивать их результаты. Достигая максимального совпадения результатов подбором постоянной времени  $\theta$ , можно определить значение последней.

В данной работе рассматривалось воздействие на дугу трапецидальных импульсов тока с различными длительностями фронтов. Расчеты проводились для аргоновой дуги длиной 3,0 мм с тугоплавким катодом и водоохлаждаемым анодом. Параметры импульса варьировались следующим образом: длительность переднего и заднего фронтов импульса 20, 100, 200 мкс. Предполагалось, что после подъема (спада) тока дуга горит при постоянном токе, соответствующем окончанию переходного процесса, – вплоть до установления стационарного состояния. Катодное и анодное падения потенциала в зависимости от текущей величины тока выбирались в соответствии с данными рис. 2 и 4. Результаты расчета динамической ВАХ для моделей дуги с распределенными параметрами представлены на рис. 6.

Кратко опишем, как рассчитывались динамические ВАХ с помощью модели дуги с сосредоточенными параметрами при подаче трапецидального импульса тока (см. рис. 7).

Подобное воздействие можно рассматривать поэтапно, как последовательное воздействие фронтов импульсов (длительностями  $t_{f1}$  и  $t_{f2}$ ) и постоянного тока (длительностями импульса  $t_i$  и  $t_p$ ). Общие решения дифференциального уравнения (8) для этих этапов, имеют вид

$$i_{\theta C}^2(t, I_{\theta}, I_1) = I_1^2 + (I_{\theta}^2 - I_1^2)e^{-t/\theta}; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} i_{\theta f}^2(t, I_{\theta}, I_1, I_2, t_f) = & I_{\theta}^2 e^{-t/\theta} + I_1^2 (1 - e^{-t/\theta}) - \\ & - 2 \frac{\theta}{t_f} I_1 (I_2 - I_1) \left( 1 - \frac{t}{\theta} - e^{-t/\theta} \right) + \\ & + 2 \left( \frac{\theta}{t_f} \right)^2 \left( 1 - \frac{t}{\theta} + \frac{t^2}{2\theta^2} - e^{-t/\theta} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

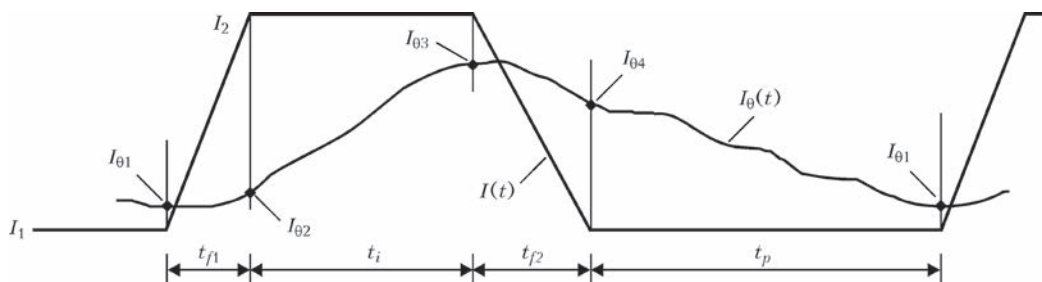


Рис. 7. Исследование воздействия на дугу трапецидального импульса тока с помощью метода припасовывания

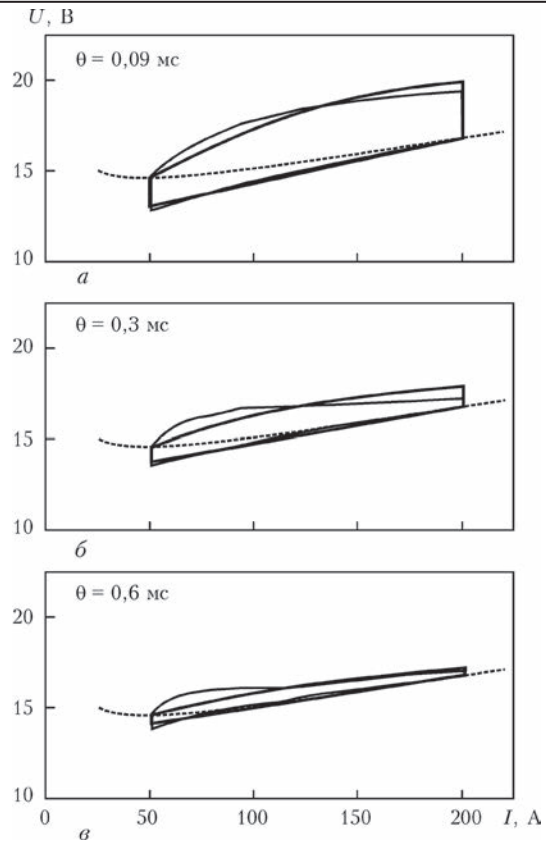


Рис. 6. Динамические вольт-амперные характеристики дуги при различных длительностях фронтов импульса: а — длительность фронта 20 мкс; б — длительность фронта 100 мкс; в — длительность фронта 200 мкс; пунктир — статическая ВАХ дуги; сплошная тонкая — динамическая ВАХ дуги (модель с распределенными параметрами); сплошная жирная — динамическая ВАХ дуги (модель с сосредоточенными параметрами)

где  $t_f$  — длительность фронта;  $I_0$  — начальное значение тока состояния на каждом этапе.

Для получения стационарного решения применяли метод припасовывания, с помощью которого получили условия на границах этапов

$$\begin{aligned} i_{\theta f}(t_{f1}, I_{\theta1}, I_1, I_2, t_{f1}) &= I_{\theta2}; \quad i_{\theta C}(t_i, I_{\theta2}, I_2) = I_{\theta3}; \\ i_{\theta f}(t_{f2}, I_{\theta3}, I_2, I_1, t_{f2}) &= I_{\theta4}; \quad i_{\theta C}(t_p, I_{\theta4}, I_1) = I_{\theta1}. \end{aligned} \quad (12)$$

Матричная форма записи придает решениям уравнений (12) компактный вид



$$\begin{pmatrix} I_{\theta 1}^2 \\ I_{\theta 2}^2 \\ I_{\theta 3}^2 \\ I_{\theta 4}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -e^{-t_{f1}/\theta} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -e^{-t_i/\theta} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -e^{-t_{f2}/\theta} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -e^{-t_p/\theta} \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} i_{\theta f}^2(t_{f1}, 0, I_1, I_2, t_{f1}) \\ i_{\theta c}^2(t_i, 0, I_2) \\ i_{\theta f}^2(t_{f2}, 0, I_2, I_1, t_{f2}) \\ i_{\theta c}^2(t_p, 0, I_1) \end{pmatrix} \quad (13)$$

Подставляя значения токов состояния на границах этапов из формулы (13) в выражения (10) и (11), получим зависимости изменения тока состояния от времени при воздействии трапецидального импульса на дугу.

Если длительность импульса и паузы взять достаточно большими (чтобы дуга успевала достичь стационарного состояния), результаты, полученные с помощью модели с сосредоточенными параметрами, можно сравнивать с ре-

зультатами, полученными для одиночных фронтов (см. рис. 6) с помощью модели с распределенными параметрами.

Значения постоянной времени  $\theta$  в модели с сосредоточенными параметрами, полученные сравнением двух моделей, указаны на этом рисунке. Заметим, что постоянная времени убывает с уменьшением длительности фронтов импульса. Характерной особенностью ВАХ динамической дуги является то, что она представляется в виде петли гистерезиса, в которой верхняя и нижняя кривые соответствуют переднему и заднему фронтам импульса, а вертикальные отрезки — переходу в стационарное состояние дуги (для сопоставления на этих же рисунках нанесена статическая ВАХ). Динамическая ВАХ в виде петли гистерезиса была получена экспериментально в работах [10, 11]. Физической причиной возникновения такой петли является различная степень инерционности процессов переноса энергии, импульса и заряда при подъеме и спаде тока [5]. Отметим, что с увеличением длительности импульса размах петли гистерезиса уменьшается и ВАХ динамической дуги приближается к ВАХ статической дуги.

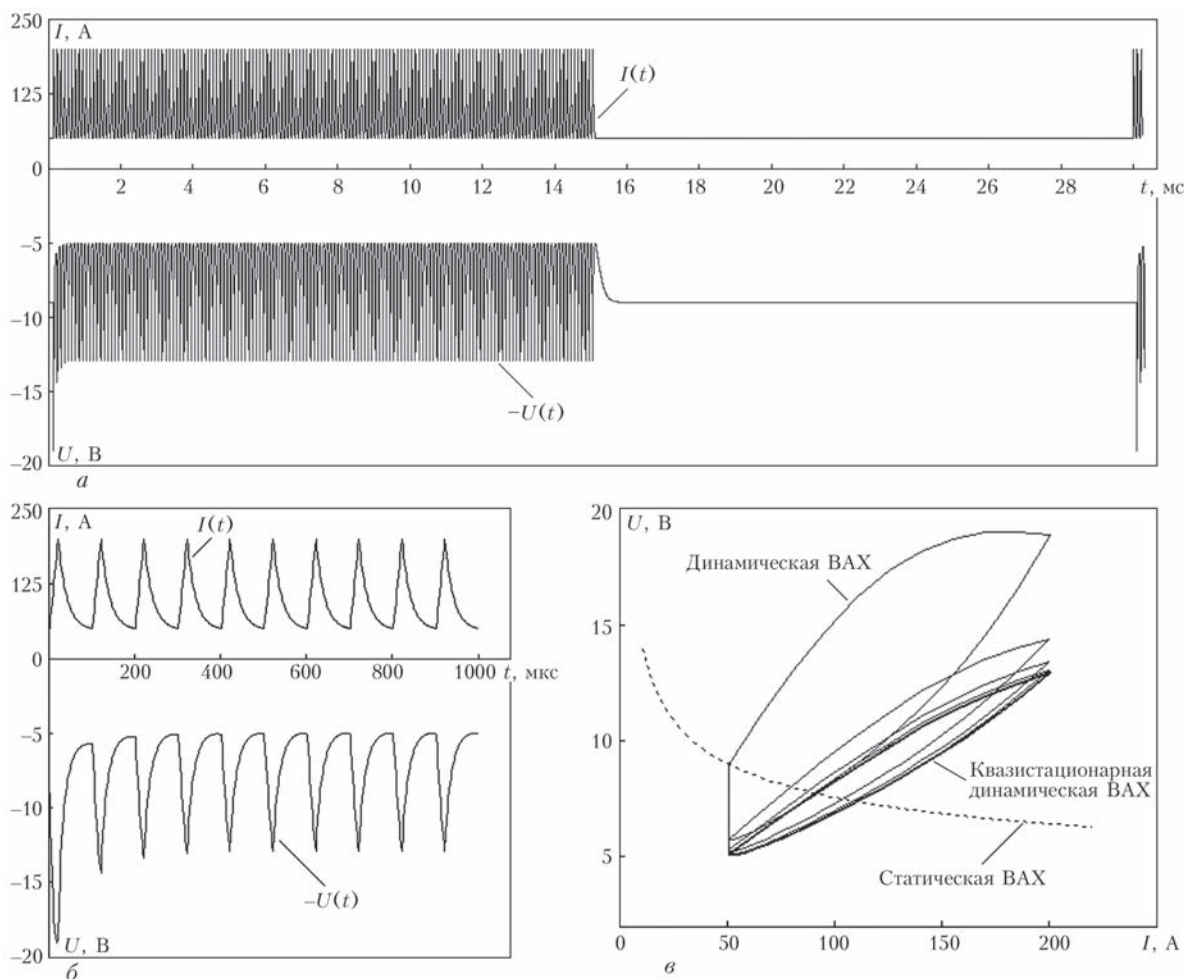


Рис. 8. Воздействие на дугу пакетов высокочастотных импульсов тока: а — временные зависимости тока дуги и напряжения на ней; б — воздействие нескольких начальных импульсов пакки (укрупненный масштаб рисунка а); в — расчетная динамическая ВАХ дуги при таком воздействии

После отработки модели динамической дуги с сосредоточенными параметрами, описанной в разделе 3, и калибровки постоянной времени, эта модель была применена для расчета динамической ВАХ при подаче пачек высокочастотных импульсов. Экспериментально импульсы генерировались при помощи устройства, разработанного в отделе физики газового разряда и техники плазмы ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. Устройство генерирует пачки ВЧ импульсов в диапазоне частот 5...25 кГц с формой близкой к треугольной. Частота следования пачек от 1 до 75 Гц, заполнение пачки ВЧ импульсами от 1 до 99 %.

Были проведены экспериментальные исследования воздействия на дугу пачек высокочастотных импульсов и получены осциллограммы изменения во времени тока и напряжения дуги. Теоретическое исследование такого же воздействия с помощью модели с сосредоточенными параметрами показало (см. рис. 8) хорошее совпадение результатов с экспериментальными данными, что свидетельствует об адекватности предложенного описания переходных процессов в дуге при высокочастотной модуляции сварочного тока. Данные рис. 8, в свидетельствуют о том, что реакция дуги на шесть-восемь начальных импульсов пачки отличается от реакции на все остальные импульсы. Только по прошествии этого переходного процесса формируется квазистационарная динамическая ВАХ дуги.

## Выводы

С учетом неэквипотенциальности границ столба электрической дуги с ее приэлектродными областями, введено понятие эффективных значений составляющих напряжения на дуге, а именно: катодного и анодного падений потенциала, а также напряжения на столбе. На основе модели с распределенными параметрами вычислены эффективные значения падения напряжения на столбе и анодном слое аргоновой дуги с тупоплавким катодом и водоохлаждаемым анодом. Эффективное катодное падение потенциала в такой дуге определено расчетно-экспериментальным методом.

Показано, что при соответствующем выборе постоянной времени результаты расчетов переходных процессов в импульсной дуге с тупоплавким катодом на основе модели с сосредоточенными параметрами достаточно точно соответствуют расчетным данным, полученным при помощи модели с распределенными параметрами. Динамическая модель дуги с сосредоточенными параметрами не требует больших вычислительных ресурсов, что делает ее перспективной для исследова-

ния переходных процессов при подаче пачек высокочастотных импульсов.

На основе сравнительного анализа моделей с сосредоточенными и распределенными параметрами, описывающих переходные процессы в импульсной дуге с тупоплавким катодом, получены вольт-амперные характеристики такой дуги. Показано, что с увеличением крутизны фронтов импульса тока размах петли гистерезиса динамической вольт-амперной характеристики дуги увеличивается.

При высокочастотной модуляции тока дуги установление квазистационарной вольт-амперной характеристики импульсной дуги с тупоплавким катодом достигается после прохождения 6...8 импульсов.

1. Гуревич С.М., Замков В.Н., Кушницренко Н.А. Повышение эффективности проплавления титановых сплавов при аргонодуговой сварке // Автомат. сварка. – 1965. – № 9. – С. 1–4.
2. Ющенко К.А., Коваленко Д.В., Коваленко И.В. Применение активаторов при дуговой сварке вольфрамовым электродом в инертных газах (А-ТИГ) сталей и сплавов // Там же. – 2001. – № 7. – С. 37–43.
3. Steen W.M., Eboo M. Arc augmented laser welding // Metal Construction. – 1979. – № 7. – P. 332–335.
4. Lu S., Fujii H., Nogi K. Marangoni convection and weld shape variations in Ar-O<sub>2</sub> and Ar-CO<sub>2</sub> shielded GTA welding // Materials Science and Engineering: A. – 2004. – **380**, № 1-2. – P. 290–297.
5. Кривцун И.В., Крикент И.В., Демченко В.Ф. Моделирование динамических характеристик импульсной дуги с тупоплавким катодом // Автомат. сварка. – 2013. – № 7. – С. 14–25.
6. Кривцун И.В., Демченко В.Ф., Крикент И.В. Модель процессов тепло-, массо- и электропереноса в анодной области и столбе сварочной дуги с тупоплавким катодом // Там же. – 2010. – № 6. – С. 3–11.
7. Sanders N.A., Pfender E. Measurement of anode falls and anode heat transfer in atmospheric pressure high intensity arcs // J. of Appl. Phys. – 1984. – **55**, № 3. – P. 714–722.
8. Крикент И.В., Кривцун И.В., Демченко В.Ф. Моделирование процессов тепло-, массо- и электропереноса в столбе и анодной области дуги с тупоплавким катодом // Автомат. сварка. – 2012. – № 3. – С. 7–11.
9. Крикент И.В., Кривцун И.В., Демченко В.Ф. Моделирование электрической дуги с тупоплавким катодом и испаряющимся анодом // Там же. – 2014. – № 9. – С. 19–26.
10. Взаимодействие излучения CO<sub>2</sub>-лазера с плазмой аргоновой дуги при гибридной (лазер+ТИГ) сварке / И.В. Кривцун, И.В. Крикент, В.Ф. Демченко и др. // Там же. – 2015. – № 3-4. – С. 7–16.
11. Cathode Fall Voltage of TIG Arcs from a Non-equilibrium Arc Model / D. Uhrlandt, M. Baeva, R. Kozakov, G. Gött // IIW Essen, 12.09.2013, Group 212 – Physics of Welding. – 21 p.
12. Сидорец В.Н., Пентегов И.В. Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой. – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. – 272 с.
13. Трофимов Н.М., Синицкий Р.В. Динамические характеристики импульсной дуги при сварке в аргоне // Свароч. пр-во. – 1967. – № 8. – С. 18–19.
14. Соколов О.И., Гладков Э.А. Динамические характеристики свободной и сжатой сварочных дуг постоянного тока с неплавящимся электродом // Там же. – 1977. – № 4. – С. 3–5.

Поступила в редакцию 26.10.2015

# ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ МНОГОСЛОЙНЫХ ШВОВ С РАЗЛИЧНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ К ОБРАЗОВАНИЮ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН\*

К.А. ЮЩЕНКО, Л.И. МАРКАШОВА, А.В. ЗВЯГИНЦЕВА, Ю.А. ХОХЛОВА,  
О.С. КУШНАРЕВА, Н.О. ЧЕРВЯКОВ

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе рассмотрены многослойные швы, выполненные проволокой Inconel 52, имеющие высокую чувствительность к образованию трещин провала пластичности (DDC) в зоне термического влияния (ЗТВ) и швы, выполненные проволокой Inconel 52MSS, которые оказались нечувствительными к образованию трещин данного типа при определенном уровне скоростей деформации. Исследовали изменения структурных характеристик швов, выполненных указанными проволоками, методами трансмиссионной микроскопии, микрорентгеноспектрального анализа, измерения микротвердости, а также с помощью дифракции отраженных электронов. Библиогр. 9, табл. 2, рис. 8.

*Ключевые слова:* многослойная наплавка, трещины провала пластичности, никелевые сплавы, плотность дислокаций, энергия дефекта упаковки, микротвердость

Прогнозирование и управление структурой и свойствами металлических материалов и сварных конструкций из них требуют многоуровневого иерархического подхода к твердому телу как к совокупности взаимосвязанных подсистем, таких как: электронная подсистема; кристаллическая решетка, структура которой определяется электронной подсистемой; подсистема дефектов кристаллической решетки; поверхностные слои; все внутренние поверхности раздела; отдельные фазовые подсистемы в сложных гетерогенных средах [1].

На современном этапе построение многоуровневой модели деформируемого твердого тела находится на активной стадии своего развития. При этом экспериментально исследуются основные характеристики отдельных подсистем, их функциональные взаимосвязи, закономерности их самосогласованного изменения в различных полях внешних воздействий (механических, тепловых, электрических, радиационных и др.).

В данной работе рассмотрены изменения структуры под действием сварочного цикла для многослойных наплавов, выполненных проволоками с различной чувствительностью к образованию горячих трещин.

Известна высокая чувствительность к образованию трещин провала пластичности (DDC) в сварных соединениях никелевых сплавов типа Inconel 690, согласно которой трещины формируются в температурном интервале около 700...1000 °C по большеугловым миграционным

границам аустенитных зерен преимущественно в многопроходных швах [2–4]. При этом механические испытания на установке «Ала-Тоо» (типа Gleeble) показывают различия в склонности к образованию провала пластичности. Так, сварные соединения, выполненные проволокой Inconel 52, имеют пониженные значения относительного удлинения  $\delta$  в интервале температур 600...1000 °C в отличие от сварных соединений, выполненных проволокой Inconel 52MSS, у которых провал пластичности в соответствующем интервале температур незначителен [3].

В связи с возникающими проблемами, связанными с оценками свойств сварных соединений, предложены работы в плане моделирования условий сварки для многопроходных швов в сварных конструкциях, которые выполняли шестипроходными наплавками на пластины из сплава Inconel 690 размерами (6...8)×40×200 мм в предварительно выстроганные канавки.

Химический состав сварочных проволок и основного металла приведен в табл. 1.

Сам процесс автоматической сварки в разделку с использованием проволоки диаметром 0,9 мм выполняли неплавящимся электродом в среде аргона на режимах:  $U_d = 10,5$  В;  $v_{\text{подачи}} = 75$  м/ч;  $f_{\text{колеб}} = 60$  колеб/мин;  $A_{\text{колеб}} = 25$  мм;  $v_{\text{св}} = 6$  м/ч, указанных на рис. 1.

В данных условиях выбранные режимы сварки обеспечивали оптимальное формирование каждого валика многослойного шва при отсутствии под-

\*По материалам работы, выполненной в рамках целевой комплексной программы НАН Украины «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» (2013–2015 рр.).



Таблица 1. Химический состав сварочных проволок и основного металла, мас. %

Марка сплава	C	Mn	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	S	P	Al	Si
In 690	0,025	0,24	Основа	29,72	10,3	-	-	0,28	0,002	0,005	0,87	0,32
In 52	0,026	0,31	"-	28,8	8,5	0,03	0,03	0,51	0,001	0,004	0,72	0,12
In 52MSS	0,024	0,29	"-	30,3	7,2	2,52	3,51	0,25	0,0008	0,0006	0,22	0,15

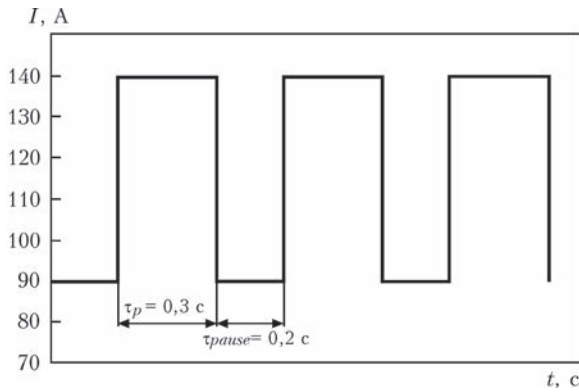


Рис. 1. Режимы автоматической сварки

резов и несплавлений между валиками и минимальном проплавлении предыдущего шва.

Для соответствующих испытаний на установке PVR-Test с переменной скоростью деформирования во время сварки в пределах 0...12 мм/мин из наплавленных пластин изготавливали образцы (строжка и шлифовка до размеров 340×180×3 мм). Методика и результаты испытаний описаны в работе [5].

В плане последующего анализа условий возникновения и характера распространении трещин DDC в сварном шве, выполненном проволоками Inconel 52MSS и Inconel 52, на первом этапе были проведены экспериментальные исследования зеренной структуры в ЗТВ сварного шва с помощью сканирующего растрового электронного микроскопа с использованием EDX и CCD-детектора. При этом методами EDX исследовали химическую неоднородность

родность ячеистой структуры металла швов Inconel 52MSS и, для сравнения, металла швов Inconel 52, нелегированных Mo и Nb (рис. 2, 3).

Исследованиями установлено, что в швах Inconel 52, в которых содержание Mo и Nb минимальное (общее содержание Mo и Nb составляет ~0,7 %), химическая неоднородность значительно меньше, что способствует образованию трещин провала пластичности. В то же время, в отдельных участках шва проволоки Inconel 52MSS содержание Nb и Mo увеличивается в ~ 2...4 раза по сравнению с общим содержанием (Mo и Nb порядка 6 %).

На следующем этапе исследований с целью изучения тонкой (дислокационной) структуры металла различных зон сварного соединения, в том числе и характера субструктуры, деталей межзеренных, субзеренных границ и других параметров структуры, использовали метод просвечивающей (трансмиссионной) электронной микроскопии. Прямые исследования тонкой структуры на просвет выполнены на установке JEM-200CX (фирмы «JEOL») при ускоряющем напряжении 200 кВ. В данном случае оценка скалярной плотности и характера распределения дислокаций (рис. 4) выполнялась с использованием метода секущих. При этом конкретные значения плотности дислокаций  $\rho$  определяли по зависимости:

$$\rho = \frac{M}{t} \left( \frac{n_1}{L_1} + \frac{n_2}{L_2} \right), \quad (1)$$

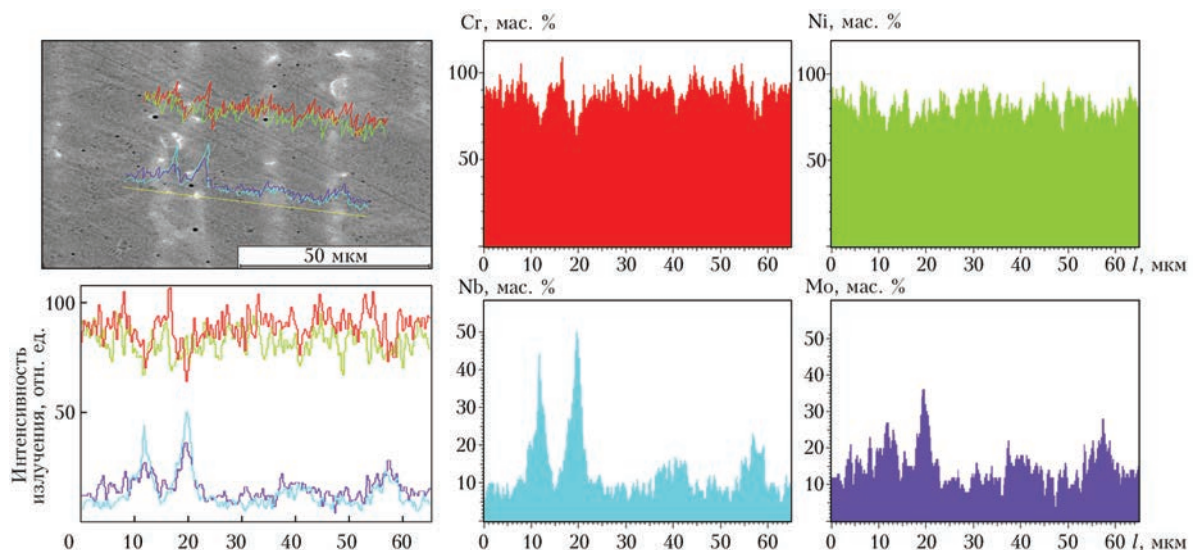


Рис. 2. Концентрационные изменения химических элементов (Cr, Ni, Nb, Mo) в исследуемых участках металла сварных швов, выполненных проволокой Inconel 52MSS в аргоне. Наблюдается химическая неоднородность по Nb и Mo

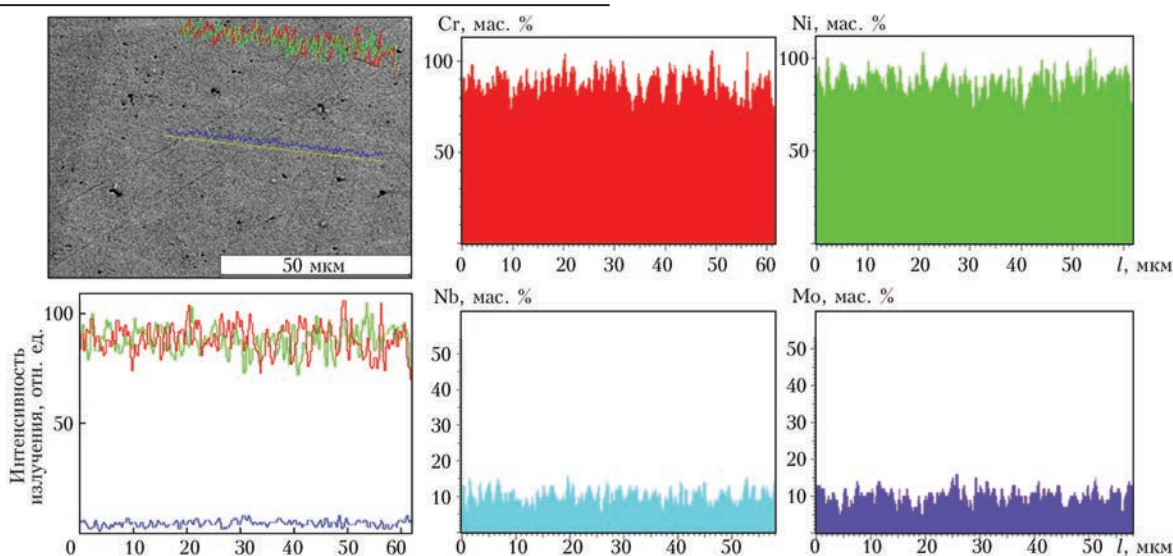


Рис. 3. Концентрационные изменения химических элементов (Cr, Ni, Nb, Mo) в исследуемых участках металла сварных швов, выполненных проволокой Inconel 52 в аргоне. Химическая неоднородность не наблюдается

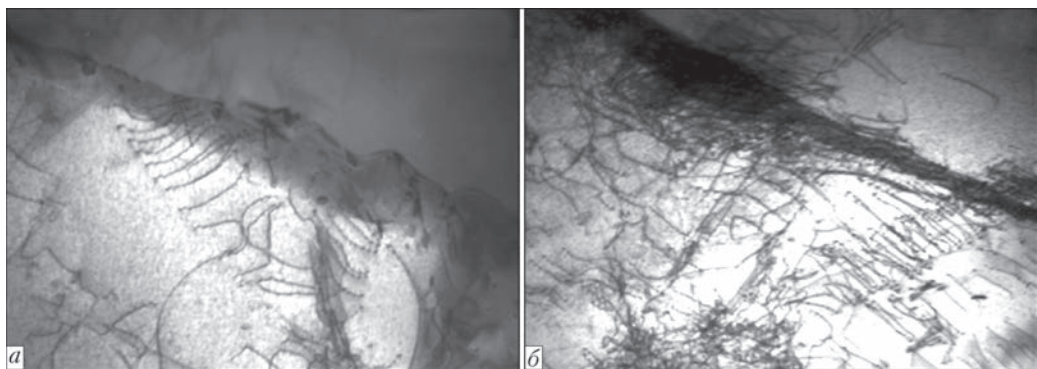


Рис. 4. Характер распределения дислокаций в металле шва: *а* — в сплаве Inconel 52 MSS (равномерное распределение с невысокой плотностью); *б* — в сплаве Inconel 52 (увеличение плотности дислокаций при градиентном ее распределении),  $\times 30000$

где  $M$ ,  $t$  — увеличение и толщина фольг;  $n_1$ ,  $n_2$  — число пересечений с горизонтальными и вертикальными линиями соответственно;  $L_1$ ,  $L_2$  — суммарная длина горизонтальных и вертикальных линий. Все результаты по оценке плотности дислокаций в металле шва (как при использовании проволоки Inconel 52 MSS, так и с Inconel 52) в разных участках структуры, а именно — во внутренних объемах зерна, вдоль межзеренных, а также субзеренных границ представлены в табл. 2.

Фазовый состав выделений, формирующихся в зоне сварки, определяли методами микродифракционного анализа.

Детальные исследования характера дислокационной структуры позволили выполнить также и оценку таких параметров дефектообразования, как энергия дефектов упаковки (ЭДУ), которая является показателем условий образования структурных дефектов и может характеризовать склонность исследуемого материала к образованию горячих трещин.

Значения энергии дефекта упаковки определяли в данном случае по ширине расщепления дислокаций, а ширину дефекта упаковки определяли прямым измерением на структурных изображениях,

полученных при исследовании тонкой структуры на просвет. Конкретные значения ЭДУ определяли согласно зависимости [6, 8]:

$$\gamma = \frac{\mu b^2 (2 - \nu)}{8\pi d_0 (1 - \nu)}, \tag{2}$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $b$  — вектор Бюргерса;  $\gamma$  — энергия дефекта упаковки;  $\mu$  — модуль сдвига;  $d_0$  — ширина расщепления дислокаций (расстояние между частичными дислокациями).

В результате исследований в данном направлении установлено, что в металле шва при использовании проволоки Inconel 52 MSS (в состоянии без трещин) ширина расщепления дислокаций

Таблица 2. Значения плотности дислокаций  $\rho$  во внутренних объемах зерен и вдоль межзеренных и субзеренных границ металла шва при использовании проволоки различного легирования

Участки структуры	Плотность дислокаций ( $\rho$ , см <sup>-2</sup> )	
	Inconel 52 MSS	Inconel 52
Объем зерна	$10^8 \dots 10^9$	$2 \cdot 10^9 \dots 8 \cdot 10^{10}$
Субграница зерна	$10^9$	$9 \cdot 10^{10}$
Граница зерна	$(6 \dots 7) \cdot 10^9 \dots 10^{10}$	$10^{11} \dots 2,2 \cdot 10^{11}$ (редко $3 \cdot 10^{11}$ )



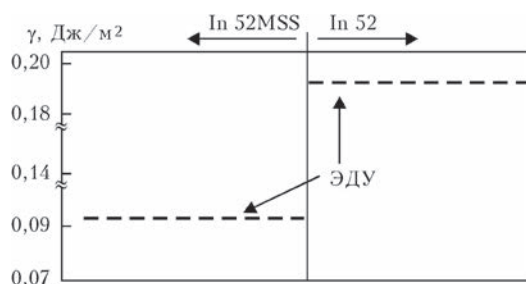


Рис. 5. Изменение энергии дефектов упаковки

(как в объеме зерен, так и у межзеренных границ) составляет 0,045...0,07 мкм (рис. 4, а), что соответствует значению энергии упаковки  $\gamma_{\text{ЭДУ}}$  порядка  $\sim 0,091 \text{ Дж/м}^2$  (рис. 5). Следует при этом отметить, что в данном металле шва повышенное содержание Мо (3,51 %) и Nb (2,51 %) снижает значение энергии дефектов упаковки, что и приводит к повышению трещиностойкости исследуемого металла.

Для более детального анализа характера распространения трещин DDC в сварном шве, выполненном проволоками Inconel 52MSS и Inconel 52, были проведены экспериментальные исследования зеренной структуры вблизи трещины в ЗТВ сварного шва

с помощью сканирующего растрового электронного микроскопа фирмы «Zeiss» EVO-50 с использованием CCD-детектора. Карты кристаллографической ориентации зерен (рис. 6) для каждого исследуемого образца свидетельствуют о том, что трещины провала пластичности в ЗТВ сварного соединения распространяются по большеугловым границам (рис. 7), что также подтверждается в работе [9].

Что же касается образцов, выполненных проволокой Inconel 52MSS, то в области ЗТВ образцов такого типа трещин не обнаружено. Дополнительными исследованиями субструктуры отмечено наличие по телу зерен большого количества малоугловых границ с разориентировкой фрагментов  $2...4^\circ$ . В швах Inconel 52 малоугловые границы практически отсутствуют. Статистические исследования мест распространения трещин провала пластичности в ЗТВ показали, что такого типа дефекты распространялись в основном по границам зерен с ориентацией преимущественно  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 101 \rangle$  либо по границам зерен с ориентацией  $\langle 100 \rangle$ .

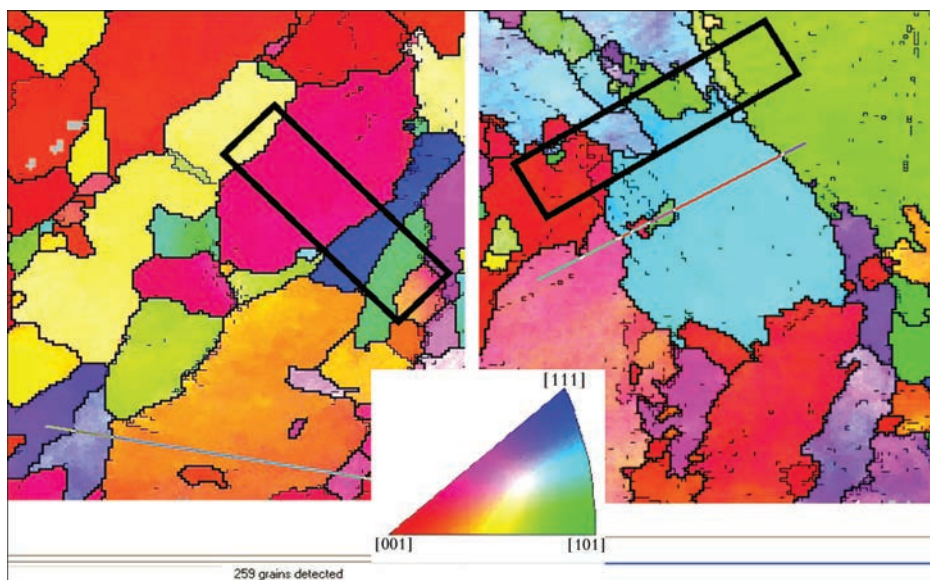


Рис. 6. Фрагменты ориентации кристаллитов (обратная полюсная фигура) металла ЗТВ сварных швов, выполненных проволоками Inconel 52 (а) и Inconel 52MSS (б). Прямоугольниками отмечены места, где проводилось измерение микротвердости

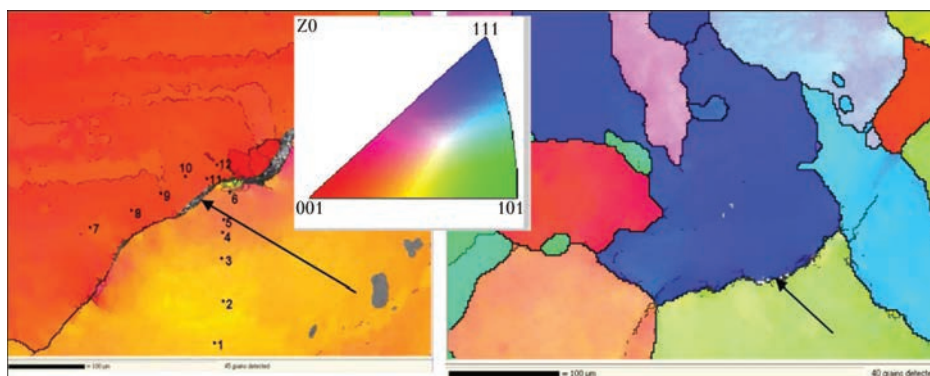


Рис. 7. Кристаллографическая картина расположения трещин в металле ЗТВ сварного соединения Inconel 52. Стрелками показаны трещины по границам зерен



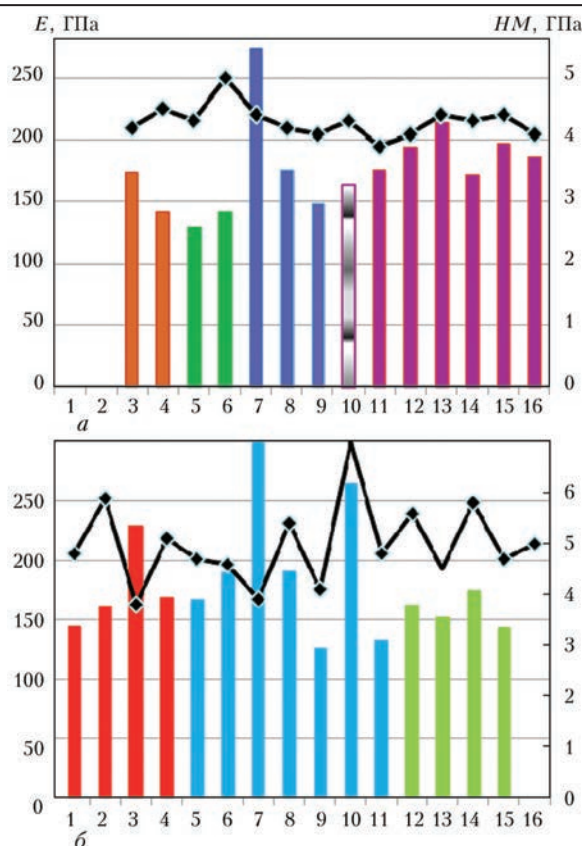


Рис. 8. Значения микротвердости  $HM$ , ГПа и модуля упругости  $E$ , ГПа для ЗТВ сварных соединений, выполненных проволоками Inconel 52 (а) и Inconel 52MSS (б)

Далее на зеренных структурах с известными кристаллографическими направлениями были измерены модули упругости и микротвердость. Цель эксперимента — изучение механических и кристаллографических изменений в процессе пластической деформации поликристаллического никелевого сплава и оценка локализации пластической деформации в пределах нескольких зерен методом микроиндентирования. При этом измерения микротвердости проводили на микроиндентометре Микрон-гамма с использованием нагрузки 5 и 10 г.

Результаты измерений показали значения микротвердости для Inconel 52 в пределах 2,8...5,5 ГПа, в то время как значения микротвердости для образца, выполненного проволокой Inconel 52MSS, имеют больший разброс значений — 2,9...7,0 ГПа (рис. 8).

## Выводы

В результате исследований многослойных наплавов, выполненных проволоками с различной чувствительностью к образованию горячих трещин, показано, что микроструктурные составляющие и их изменения под действием сварочного термического цикла значительно влияют на стойкость

сварных соединений к образованию горячих трещин.

В швах Inconel 52, в которых содержание Mo и Nb минимально (общее содержание Mo + Nb = 0,7 %), химическая неоднородность существенно уменьшается, что способствует возникновению трещин DDC. В то же время в отдельных участках шва Inconel 52MSS, где содержание Nb и Mo возрастает в 2...4 раза по сравнению с общим содержанием (Mo + Nb = 6 %), трещины в швах данного типа отсутствуют.

Установлено, что тонкая структура металла швов при использовании проволоки Inconel 52 характеризуется более высокой плотностью дислокаций, особенно у границ зерен (порядка до  $\rho \sim 10^{11} \dots 2,2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ).

Отсутствие трещин в металле шва в случае использования проволоки Inconel 52 MSS связано с равномерным (без градиентов) распределением плотности дислокаций, а также снижением значений энергии дефектов упаковки  $\gamma_{\text{ЭДУ}}$  (до  $\sim 0,091 \text{ Дж/м}^2$ ).

Трещины провала пластичности в ЗТВ сварных соединений распространяются, как правило, вдоль большеугловых границ зерен.

Результаты измерений микротвердости швов, выполненных проволокой Inconel 52, показали значения в пределах 2,8...5,5 ГПа, в то время как значения микротвердости для образца, выполненного проволокой Inconel 52MSS, имеют больший разброс — от 2,9 до 7,0 ГПа.

1. Панин В.Е., Егорушкин В.Е. Неравновесная термодинамика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. Корпускулярно-волновой дуализм пластического сдвига // Физическая мезомеханика. — 2008. — № 11. — С. 9–30.
2. *In situ scanning electron microscopy high temperature deformation experiments to study ductility dip cracking of Ni-Cr-Fe alloys* / E.A. Torres, F.G. Peternella, R. Caram, A.J. Ramirez // In-situ Studies with Phonons, Neutrons and Electrons Scattering; Ed. by T. Kannengiesser et al. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. — P. 28.
3. *Comparative hot cracking evaluation of welded joints of alloy 690 using filler metals Inconel® 52 and 52 MSS* / K. Yushchenko, V. Savchenko, N. Chervyakov et al. // Welding in the World. — 2011. — № 55, № 9/10. — P. 28–35.
4. Lippold J.C., Kotecki D.J. Welding metallurgy and weldability of stainless steels, copyright // John Wiley & Sons. — 2005.
5. Исследование склонности к образованию трещин аустенитного материала с использованием методики PVR-Test / К.А. Ющенко, В.С. Савченко, Н.О. Червяков и др. // Автомат. сварка. — 2014. — № 6-7. — С. 13–16.
6. Электронная микроскопия тонких кристаллов / П. Хирш, А. Хови, Р. Николсон и др. — М.: Мир, 1968. — 574 с.
7. Томас Г. Электронная микроскопия металлов. — М.: Изд. Иностран. лит., 1963. — 351 с.
8. Горелик С.С., Ростаргуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электрооптический анализ. — М.: Металлургия, 1970. — 370 с.
9. Collins M.G., Ramirez A.I., Lippold J.C. An investigation of ductility-dip cracking in nickel-based weld metals-Part III // Welding J. — 2004. — № 2. — P. 39–49.

Поступила в редакцию 22.12.2015

# ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХЗВУКОВОГО ЛАЗЕРНОГО НАПЫЛЕНИЯ

ДЗИНЬХУА ЯО<sup>1,2</sup>, В.С. КОВАЛЕНКО<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Исследовательский центр ядерных технологий и оборудования,

Дзеджанский технологический ун-т. 310014, Хангжоу, ул. Чаованг, № 18, Китай. E-mail: laser@zjut.edu.cn

<sup>2</sup>Центр по разработке и внедрению лазерного оборудования провинции Дзеджан.

Дзеджанский технологический ун-т. 310014, Хангжоу, ул. Чаованг, № 18, Китай. E-mail: laser@zjut.edu.cn

<sup>3</sup>НИИ лазерных технологий НТУУ «Киевский политехнический институт».

03056, г. Киев-56, пр-т Победы, 37, Украина. E-mail: kovalenko.volodymyr@gmail.com

Сверхзвуковое лазерное напыление (SLD) — это новый процесс нанесения и получения покрытий, при котором сверхзвуковой поток порошка, генерируемый в холодную струю (CS), проникает на подложку, которая одновременно облучается лазером. Этот процесс находит все большее применение для напыления покрытий и аддитивного изготовления металлических изделий благодаря ряду своих уникальных преимуществ: напыления (осаждения) в твердом состоянии плотных, однородных и непористых покрытий на подложку, высокой скорости процесса при сниженных эксплуатационных расходах без применения дорогостоящего газового нагрева и больших объемов гелия. Данный процесс открывает также новые возможности для эффективного напыления металлических порошков высокой твердости, которые, как правило, трудно напылять, используя только CS. На основе результатов исследования в статье проведен систематический обзор состояния дел в области применения способа сверхзвукового лазерного напыления с точки зрения выбора материалов, оптимизации процесса, определения свойств, конструкции оборудования и т.д. Были глубоко проанализированы существующие проблемы в данных аспектах и предложены соответствующие решения. Вместе с тем были детально разработаны потенциальные промышленные применения способа сверхзвукового лазерного напыления в различных областях. Рассмотрены также перспективы и проблемы, связанные с этой технологией, намечены направления дальнейших исследований и инноваций в сверхзвуковом лазерном напылении, как зарождающейся комбинированной технологии аддитивного производства с высокой эффективностью, низкими затратами и высоким качеством.

*К л ю ч е в ы е с л о в а :* сверхзвуковое лазерное напыление, материалы, параметры процесса, технические характеристики, применения

Сверхзвуковое лазерное напыление (SLD) — это новая разработанная технология в области лазерной обработки материалов, которую можно использовать для модификации поверхностей и покрытий инженерных конструкций для повышения их функциональности [1–3]. В этой технологии комбинируется подача сверхзвукового потока порошка в холодную струю (CS) с лазерным нагревом участка напыления. При SLD лазерное излучение нагревает как распыляемые частицы, так и подложку в пределах от 30 до 80 % их температуры плавления, тем самым значительно снижая прочность частиц и подложки, и позволяя частицам пластически деформироваться и создавать покрытие при скорости удара, составляющей около половины скорости истечения CS.

Технология SLD находит все большее применение для напыления покрытий благодаря своим технологическим и экономическим преимуществам по сравнению с обычными способами напыления покрытий, таким как напыление в твердом состоянии плотных, однородных непористых покрытий на подложку: высокой скорости напыления со снижением эксплуатационных расходов без использования дорогостоящего процесса на-

грева и инертных газов, меньшей чувствительностью к характеристикам материалов исходного сырья, уплотнением трудно напыляемых порошков, значительным улучшением свойств материалов покрытий. Что еще очень важно, более низкие температуры обработки и более короткое время обработки способом SLD позволяет напылять покрытия и изготавливать элементы почти точной формы с минимальным плавлением или без него, что, таким образом, помогает избежать вредных воздействий высокотемпературных процессов, таких, как лазерное плакирование и традиционных процессов термического распыления, которые включают в себя подплавление подложки напыления, высокие термически-индуцированные остаточные напряжения, ухудшение микроструктуры в затвердевшем состоянии, которые приводят к снижению механических свойств. По сравнению с CS, включение лазерного нагрева в SLD может значительно смягчить распыляемые частицы и подложку, что приведет к уменьшению критической скорости напыления и обеспечит сцепление при ударе на скоростях, равных половине тех, что наблюдаются при CS даже при напылении материалов, которые трудно обрабатывать,

используя только CS. Исключение необходимости высоких скоростей удара позволяет использовать холодный или слегка нагретый азот вместо высокотемпературного гелия в качестве рабочего газа, способствуя тем самым уменьшению эксплуатационных расходов более чем на порядок. Такое снижение капитальных эксплуатационных затрат означает, что SLD может быть более рациональным для случаев в которых CS зарекомендовал себя слишком дорогим, обеспечивая полностью твердый процесс, что позволяет расширить диапазон его применения. Этим способом успешно выполнены разнообразные покрытия из таких материалов, как Cu, Ti, Стеллит 6, Ni60, сплав Al–Cu, сплав Al–Si [4–16].

Для разработки направлений дальнейших исследований и инноваций в сверхзвуковом лазерном напылении, как зарождающейся комбинированной технологии аддитивного производства, был проведен систематический обзор состояния дел в области применения этого способа с точки зрения выбора материалов, оптимизации процесса, определения свойств, конструкции оборудования и т.д. Были глубоко проанализированы существующие проблемы в данных аспектах и предложены соответствующие решения. Вместе с тем были детально разработаны потенциальные промышленные применения способа сверхзвукового лазерного напыления в различных областях, а также перспективы и проблемы, стоящие перед этой технологией.

**Сверхзвуковая система лазерного напыления.** Принципиальная схема системы SLD показана на рис. 1, а. Газ под высоким давлением подавался в специальное сопло через два различных выхода: один через газовый нагреватель; другой через раздатчик порошка, где находятся сырьевые порошки. Струя сырьевого порошка и газ под высоким давлением смешивались и пропускались через сопло, где частицы ускорялись до сверхзвуковой скорости. Контроль температуры газового нагрева, давления газа и скорости подачи порошка проводились с помощью блока управления холодной струей (рис. 2, а). Высокоскоростные частицы ударялись об подложку, которая синхронно нагревалась с помощью диодного лазера (рис. 2, б). Для фокусировки лазерного луча на поверхность подложки применялись комбинированные линзы. Для измерения температуры в реальном времени и контроля температуры в зоне напыления во время процесса SLD применялся высокоскоростной инфракрасный пирометр. Данные пирометра пропускались через систему обратной связи, которая изменяла мощность лазера до значения, необходимого для поддержания требуемой температуры. Сопло, лазерная головка и пирометр проходили

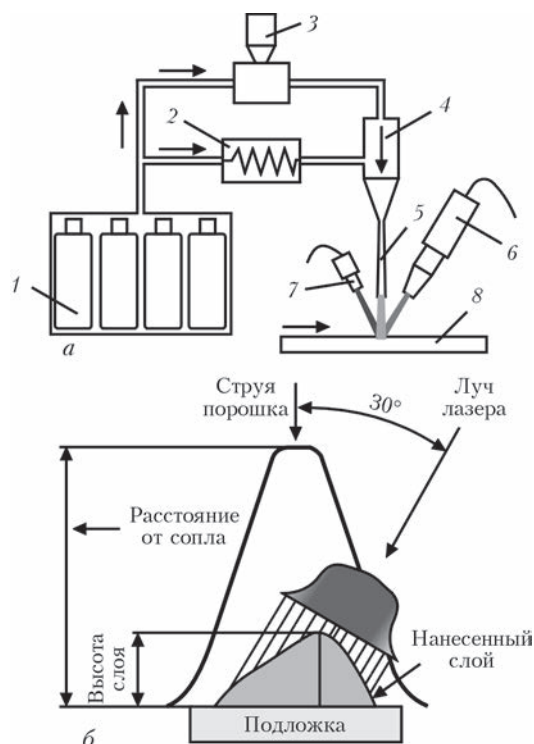


Рис. 1. Схема процесса SLD (а), воздействие лазера и распределение порошка (б): 1 — газ под высоким давлением; 2 — нагреватель газа; 3 — раздатчик порошка; 4 — смеситель; 5 — сопло; 6 — лазер; 7 — пирометр; 8 — подложка

сборку на работе, как показано на рис. 2, в. Распылительное сопло размещалось перпендикулярно поверхности подложки. Лазерный луч находился под углом 30° к нормали поверхности. Действие лазера и распределение порошка схематически изображены на рис. 1, б. В процессе напыления подложка была неподвижна, а сопло, лазерная головка и пирометр могли перемещаться и управлялись роботом. В качестве технологического газа,



Рис. 2. Установка сверхзвукового лазерного напыления: блок управления холодной струей (а); диодный лазер (б); робот (в); воздушный компрессор (г)



можно использовать сжатый воздух (или азот высокого давления), который может подаваться воздушным компрессором (или через газовый мольблок), как показано на рис. 2, г.

**Получение покрытия и его характеристики.** *Покрытия из одного материала.* В этом разделе основное внимание уделяется сравнению покрытий из одного материала, выполненных SLD и другими обычными технологиями нанесения покрытий, такими как CS и лазерной наплавкой (LC), относительно их эффективности напыления (DE), плотности покрытий, эволюции микро-структуры, межфазного сцепления, свойств и т.д.

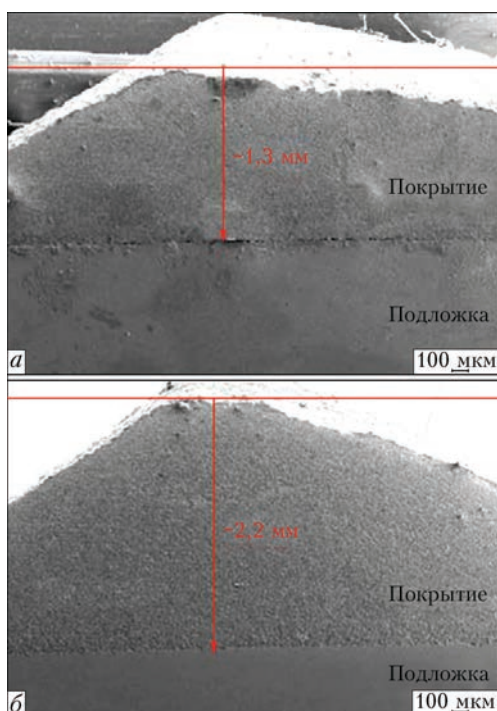


Рис. 3. Сравнение толщины покрытия CS-Cu (а); SLD-Cu (б)

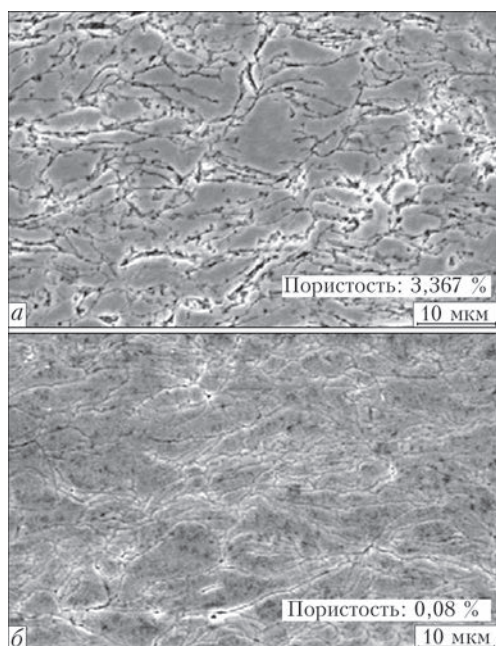


Рис. 4. Сравнение плотности покрытий CS-Cu (а); SLD-Cu (б)

*Сравнение покрытий с одним материалом, выполненных SLD и CS.* На рис. 3 показано сравнение толщины покрытий выполненных CS-Cu и SLD-Cu. Очевидно, что покрытие SLD-Cu толще покрытия CS-Cu. Максимальная толщина покрытия CS-Cu составляет около 1,3 мм, в то время как толщина покрытия SLD-Cu около 2,2 мм, то есть, лазерное излучение увеличило максимальную толщину покрытия на 70 %. Другими словами, лазерный нагрев значительно улучшил DE.

На рис. 4 показано сравнение плотности покрытий, выполненных CS-Cu и SLD-Cu. На фотографиях видно, что CS-Cu имеет множество зазоров и пор между деформированными частицами Cu, в то время как SLD имеет гораздо более плотную микроструктуру, где зазоры и поры почти не наблюдаются. Измерения пористости с использованием программного обеспечения для анализа изображений показали, что пористость покрытия CS-Cu составляла 3,367 % по площади, в то вре-

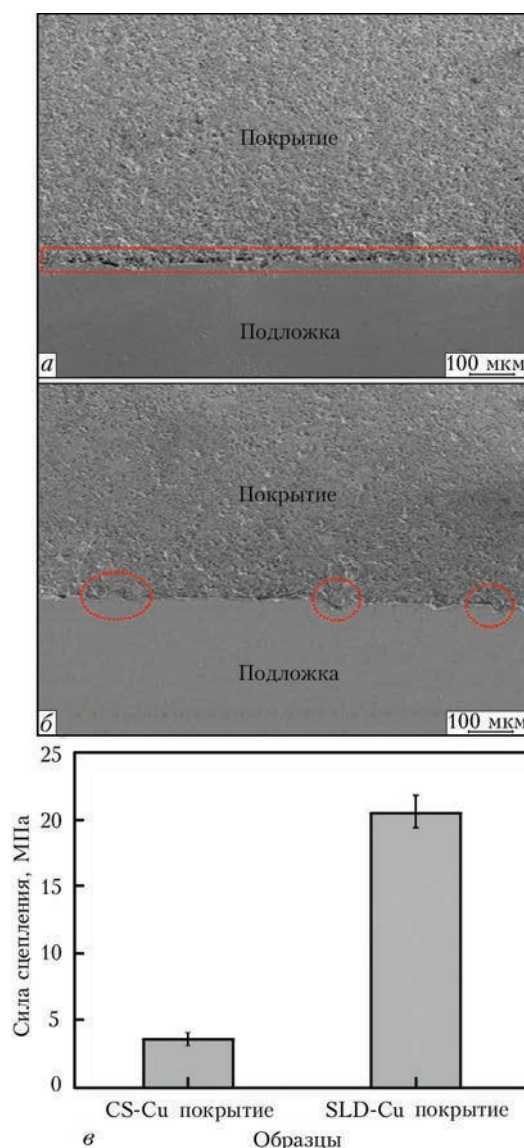


Рис. 5. Сцепление границы раздела покрытие-подложка CS-Cu (а); SLD-Cu (б); сравнение адгезионной прочности (в)

мя как у покрытия SLD-Cu она составляла всего лишь 0,08 %. Это подтверждает положительный эффект влияния лазерного излучения на плотность покрытия.

На рис. 5 представлено сцепление границы раздела покрытие-подложка у CS-Cu и SLD-Cu. Как видно из рис. 5, а, на границе раздела между слоем покрытия и подложкой образца покрытия CS-Cu наблюдается выраженная трещина. На покрытии SLD-Cu ее не обнаружено, проплавление материала произошло по границе раздела этого покрытия (рис. 5, б), что позволило повысить сцепление покрытия с подложкой. Испытание на адгезионную прочность, как описано в стандарте ASTM C633, проводилось на покрытиях CS-Cu и SLD-Cu для того, чтобы определить количественно фактическую силу сцепления для каждого покрытия. Сравнение адгезионной прочности покрытий CS-Cu и SLD-Cu показано на рис. 5, в. Можно видеть, что адгезионная прочность покрытия CS-Cu очень низкая, но она значительно увеличилась с помощью лазерного излучения.

Из приведенных выше результатов можно сделать вывод, что эффективность напыления, плотность покрытия и сцепление границы раздела покрытие-подложка у CS могут быть улучшены при помощи лазерного излучения. Улучшение DE следует соотнести со снижением критической скорости напыления из-за смягчения распыляемых частиц под действием лазерного нагрева. Один из наиболее важных параметров в процессе CS — критическая скорость напыления, которая существует для каждого напыляемого материала и

величины, которой необходимо достичь. Эффективно могут напыляться только частицы, скорости которых превышают это значение, в свою очередь, создавая требуемое покрытие. И, наоборот, частицы, которые не достигли этой пороговой скорости, способствуют эрозии подложки. Теоретическое моделирование критической скорости напыления ( $V_{cr}$ , м/с), предложенное Ассади и др. может быть выражено следующей формулой:

$$V_{cr} = 667 - 14\rho + 0,08T_m + 0,1\sigma_u - 0,4T_i,$$

где  $\rho$  — плотность материала, г/см<sup>3</sup>;  $T_m$  — температура плавления, °C;  $\sigma_u$  — максимальный предел прочности, МПа;  $T_i$  — начальная температура частиц, °C. В соответствии с формулой, предварительный нагрев частиц снизит критическую скорость напыления и в то же время температура  $T_i$  увеличится, и уменьшится предел прочности материалов  $\sigma_u$ . Увеличение  $T_i$  и сокращение  $\sigma_u$  будут способствовать снижению  $V_{cr}$ .

В процессе SLD струя порошка и лазерный луч частично перекрываются друг другом. Хотя распыляемые частицы двигались на высоких скоростях и имели ограниченное время воздействия лазером, можно предположить, что они могли с помощью лазера значительно нагреваться в полете перед ударом об подложку из-за высокой плотности мощности лазера и своих малых размеров, и тем самым снизить критическую скорость напыления. Как следствие, доля частиц, превышающих эту скорость, увеличилась бы, что привело бы к улучшению DE. В процессе CS изначально напыленные частицы забиваются последующими ударными частицами, передвигающимися с высокой скоростью. Частицы покрытия подложки, смягченные лазерным нагревом, становятся легко деформируемыми под воздействием частиц порошка при высокой скорости, что приводит к плотному их сцеплению (высокой плотности покрытия). В случае синхронного лазерного излучения на участок напыления температура подложки увеличивается и, таким образом, она смягчается. Смягченная подложка легко принимает на себя частицы. Кроме того, повышенная температура подложки может способствовать диффузии атомов между покрытием и материалами подложки, что значительно увеличивает возможность металлургического сцепления. Все это способствует хорошему сцеплению границы раздела покрытие-подложка при SLD.

Сравнение покрытий с одним материалом, выполненных SLD и LC. Способом растровой электронной микроскопии (РЭМ) определена микроструктура (рис. 6) образцов покрытия Ni60, выполненных SLD и LC. Как видно из рисунка, микроструктура покрытия SLD-Ni60 демонстрирует аккумулированную пластическую деформа-

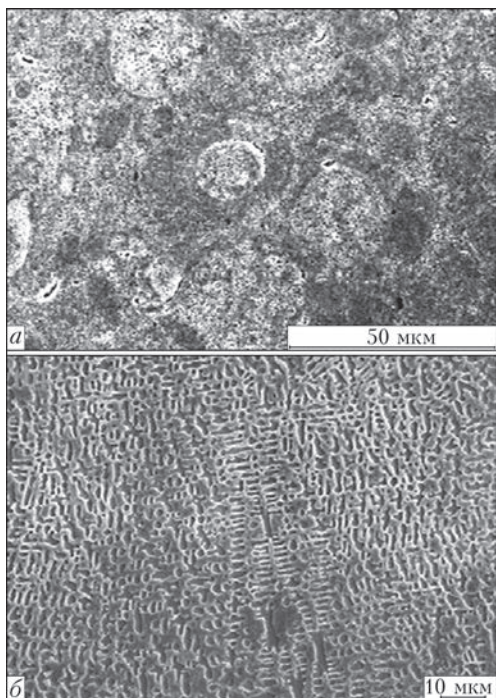


Рис. 6. Сравнение микроструктуры покрытий SLD-Ni60 (а); LC-Ni60 (б)



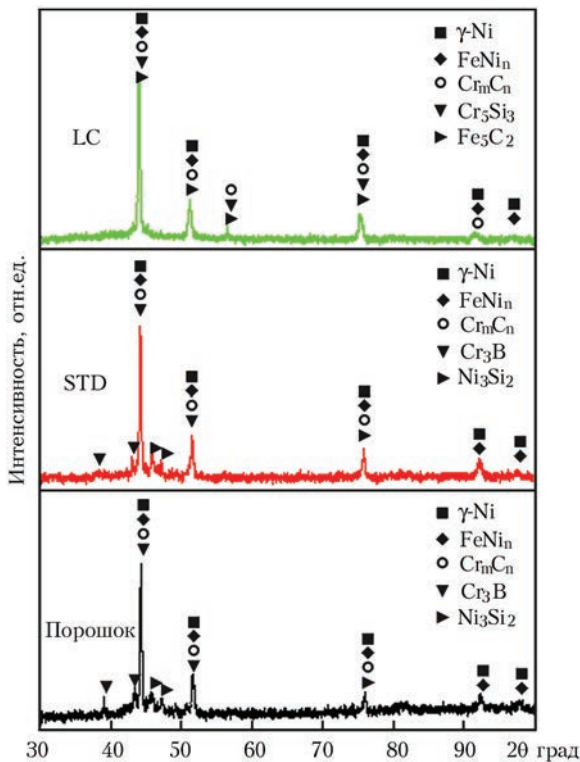


Рис. 7. Рентгенограммы порошка Ni60 и покрытия Ni60

цию частиц Ni60 с аналогичной мелкой структурой в литом состоянии для исходных частиц порошка (напыление в твердом состоянии), в то время как микроструктура покрытия LC-Ni60 демонстрирует типичное грубое плакирование дендритной структуры.

Дальнейший рентген-анализ (рис. 7) показывает, что покрытие SLD-Ni60 имеет одинаковые фазы по сравнению с исходными частицами порошка. Однако фазы на рентгенограмме покрытия LC-Ni60 отличаются от тех, что на покрытии SLD-Ni60 и порошке Ni60, так как процесс LC генерирует новую фазу  $\text{Fe}_3\text{C}_2$  за счет эффекта разбавления. На рис. 8 показаны эволюции коэффициента трения образцов покрытия, записанные во время испытания на износ. Как видно, коэффициент трения образца SLD значительно ниже и более стабильный, чем у образца LC. Глубокие плужные напылы могут наблюдаться, очевидно, на следе износа образца LC, в то время как образец SLD выглядит более гладким, как показано на рис. 9. Кроме того, ширина следа износа у образца LC шире, чем у SLD. Видно, что износостойкость покрытия SLD выше, чем износостойкость покрытия LC.

Лазерное излучение в процессе SLD обеспечивает нагрев, который может синхронно смягчать высокоскоростные частицы и подложку, в то время как нагрев при процессе LC расплавляет частицы. Так как процесс SLD имеет более низкое энергозатрачивание лазера, чем у LC, граница раздела покрытие-подложка и зона термического влияния

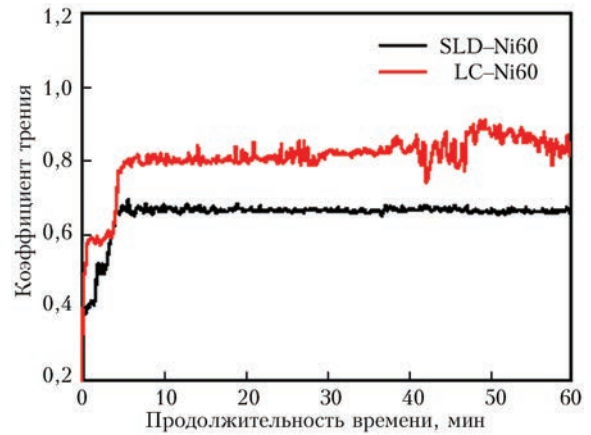


Рис. 8. Изменения коэффициента трения от времени скольжения

ния (ЗТВ) образца SLD являются более гладкими и имеют меньшую площадь. Кроме того, из-за относительно невысокой температуры (особенность напыления способом SLD), напыленное покрытие Ni60 все еще сохраняет ту же микроструктуру и фазы, что и исходные сырьевые порошковые материалы. Превосходное свойство износостойкости покрытия SLD-Ni60 по сравнению с LC следует соотносить с более тонкими структурами покрытия SLD, то есть, карбидами и боридами, которые более равномерно распределены в матрице Ni. Следует отметить, что жесткие частицы порошка Ni60 могут быть успешно напыленными при

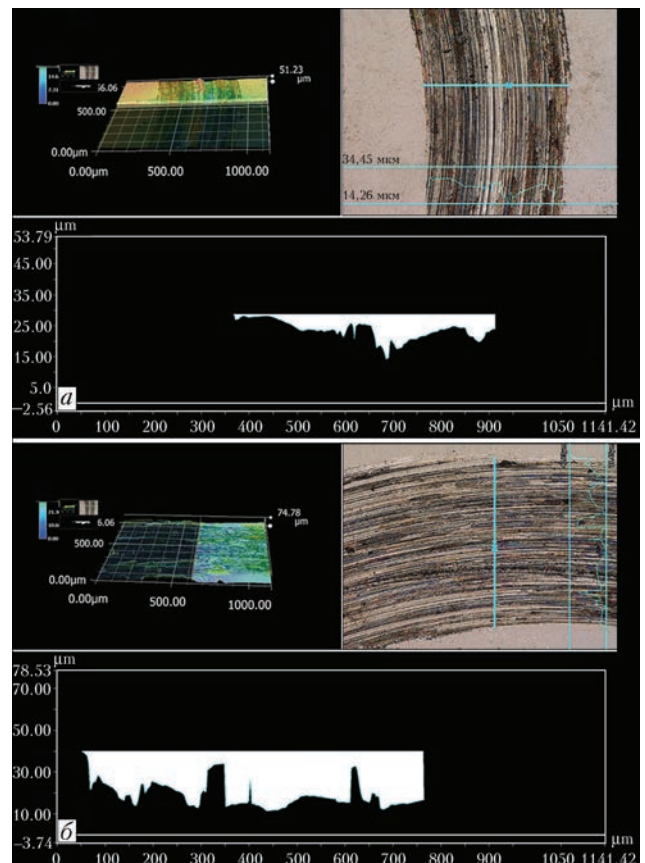


Рис. 9. Профиль поперечного сечения следа износа покрытий SLD-Ni60 (а); LC-Ni60 (б)



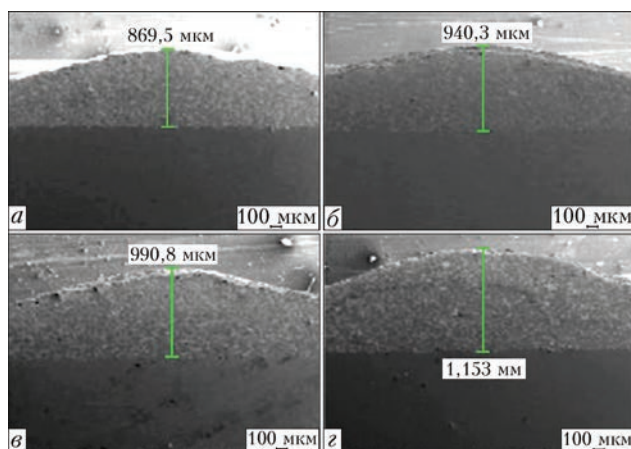


Рис. 10. РЭМ-изображения поперечного сечения образцов композитного покрытия WC/SS316L, показывающие толщину покрытия при различных температурах напыления: а — без лазерного нагрева; б — 500; в — 700; г — 900 °C

SLD, в то время как их невозможно напылять при CS, что указывает на то, что способ SLD расширяет диапазон материалов, которые могут обрабатываться при CS. Кроме того, этот новый способ напыления превосходит обычное лазерное плакирование (LC) при его использовании для напыления твердых материалов, таких как сплав Ni60, с тем, что он может подавлять растворение стальной подложки.

*Покрyтия из металлического матричного композитного материала.* В этом разделе внимание сосредоточено на сравнении покрытий из металлического матричного композитного материала (MMC), выполненных SLD и другими обычными технологиями напыления покрытий, такими как CS и LC, с акцентом на материалы, чувствительные к нагреву, такие как карбид вольфрама (WC) и алмаз.

*Сравнение покрытий металлического матричного композитного материала, выполненных SLD и CS.* На рис. 10 показаны РЭМ-изображения поперечного сечения образцов композитного покрытия WC/SS316L. Как видно, центральная максимальная высота сильно зависит от температуры лазерного нагрева. Максимальная высота покрытия WC/SS316L, напыленного без лазера, составляет 869,5 мкм и постепенно увеличивается до 1,153 мм с увеличением температуры напыления от 500 до 900 °C. Этот результат показывает, что лазерный нагрев может также повысить эффективность напыления MMC покрытий, как и покрытий из одного материала, что приписывают уменьшению критической скорости напыления при лазерном излучении. На рис. 11 видно, что частицы WC равномерно распределены по всем образцам покрытий, и концентрация частиц WC в покрытиях увеличивается с температурой напыления. На РЭМ-изображениях при большом увеличении (рис. 12) видно, что частицы WC не эффек-

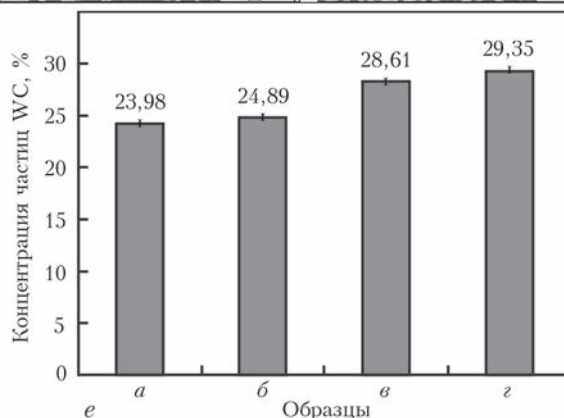
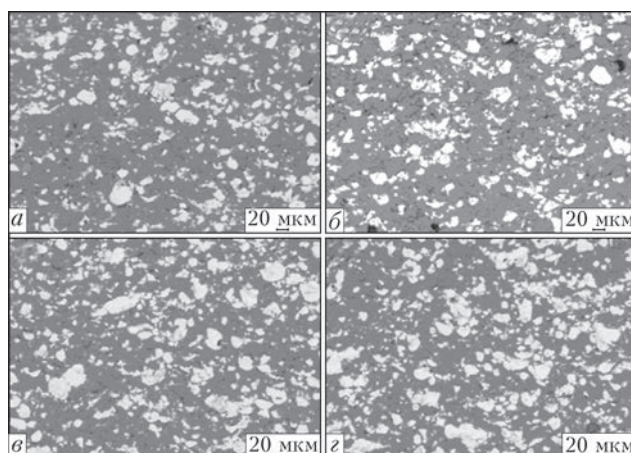


Рис. 11. Распределение и концентрация частиц WC в композитных покрытиях, полученных при различных температурах: а — без лазерного нагрева; б — 500; в — 700; г — 900 °C; д — площадь долей WC в композитных покрытиях

тивно вкраплены в матрицу SS316L в случае, когда не использовался лазерный нагрев. Хотя при более низком лазерном нагреве, или при низкой температуре напыления частицы WC могут быть вкраплены в покрытие, но очевидные зазоры все еще можно найти на границе раздела между частицами WC и матрицей SS316L, как видно на рис. 12, в. Дальнейшее увеличение температуры напыления повышает прочность сцепления границы раздела. Части-

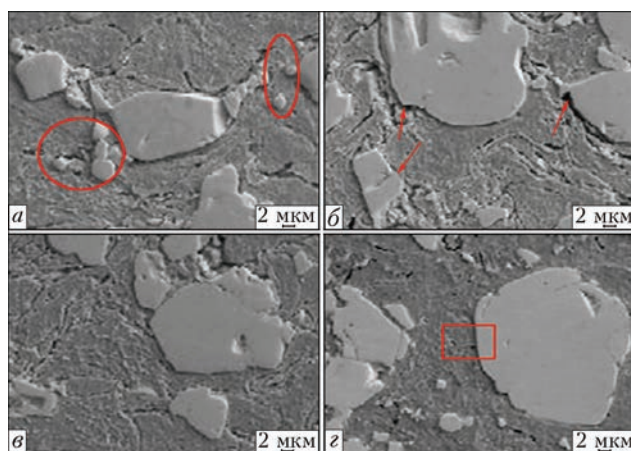


Рис. 12. Граница раздела между матрицей SS316L и частицами WC: а — без лазерного нагрева; б — 500; в — 700; г — 900 °C

цы WC хорошо вкрапливаются в матрицу SS316L при небольших зазорах.

Положительное влияние лазерного излучения на концентрацию частиц WC в композитных покрытиях WC/SS316L можно объяснить смягчением порошка SS316L. В процессе SLD частицы WC могут не деформироваться из-за высокой твердости, они вкрапливаются в деформируемую матрицу SS316L. Без помощи лазера или при более низком лазерном нагреве порошок SS316L нельзя достаточно размягчить для размещения твердых частиц, что приводит к относительно низкой концентрации WC. В случае более высокого лазерного нагрева, порошок SS316L легко деформируется при попадании частиц WC благодаря достаточному размягчению, что приводит к более высокой концентрации частиц WC. Кроме того, из-за эффекта смягчения лазерным излучением в процессе SLD, частицы порошка SS316L легче деформируются, что также способствует оседанию ударных частиц WC для образования плотного сцепления и, следовательно, получения более прочного покрытия, чем покрытия CS. Относительно высокое содержание частиц WC и прочное сцепление на границе раздела между частицами WC и матрицей SS316L способствует лучшим трибологическим свойствам покрытия WC/SS316L, получаемого при SLD, чем при CS, как показано на рис. 13.

*Сравнение покрытий из металлического матричного композитного материала, выполненных SLD и LC.* На рис. 14 показана микроструктура алмазного/ композитного покрытия Ni60, полученного при SLD. Из рисунка видно, что частицы алмаза равномерно распределены в пределах матрицы Ni60 (рис. 14, а) и прочно вкраплены в матрицу сплава Ni60 с хорошим сцеплением границы раздела, как показано на рис. 14, б. Большинство частиц алмаза на композитных покрытиях полностью удерживаются. Это может быть вызвано смягчением матрицы Ni60 при лазерном нагреве. В данном случае частицы Ni60 были бо-

лее склонными к деформированию за счет нестациональности адиабатического сдвига. Размягченные частицы Ni60 эффективно обволакивают и удерживают частицы алмаза.

На рис. 15 предоставлена некоторая информация о графитизации алмазов между алмазным/ Ni60 покрытием SLD и алмазным/ Ni60 покрытием LC. В процессе LC высокая температура и окислительная среда расплавленной ванны, получаемые при лазерном облучении, вызывают более легкую графитизацию частиц алмаза по сравнению с SLD. На рис. 15, б и г черные области показывают сильную графитизацию частиц алмаза; диффузия углерода происходила на поверхности границы раздела между частицами алмаза и матрицей Ni60. Также было обнаружено, что во время процесса LC неправильная форма алмазных частиц была заменена сферической. Однако на образце покрытия SLD не наблюдалось такой сильной графитизации, как на образце LC. Из рамановских спектров на рис. 16, можно видеть, что на образцах покрытия LC представлены не только типичная вершина алмаза размером  $1335\text{ см}^{-1}$ , а также и явная вершина неалмазного компонента размером  $1589\text{ см}^{-1}$ , в то время, как на образце покрытия SLD наблюдается только одна острая вершина алмаза размером  $1335\text{ см}^{-1}$ . Результаты анализа рамановских спектров показывают, что часть алмазных частиц графитизировалась на образце покрытия LC, однако на образце покрытия SLD графитизации не произошло. Все эти результаты служат основанием предполагать, что относительно высокое давление удара, низкая температура

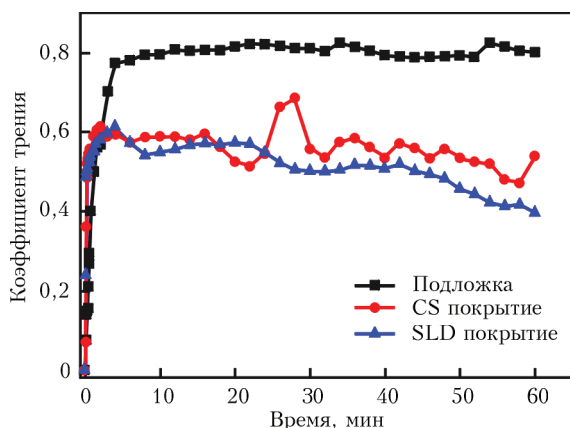


Рис. 13. Изменение коэффициентов трения от времени скольжения композитных покрытий WC/SS316L

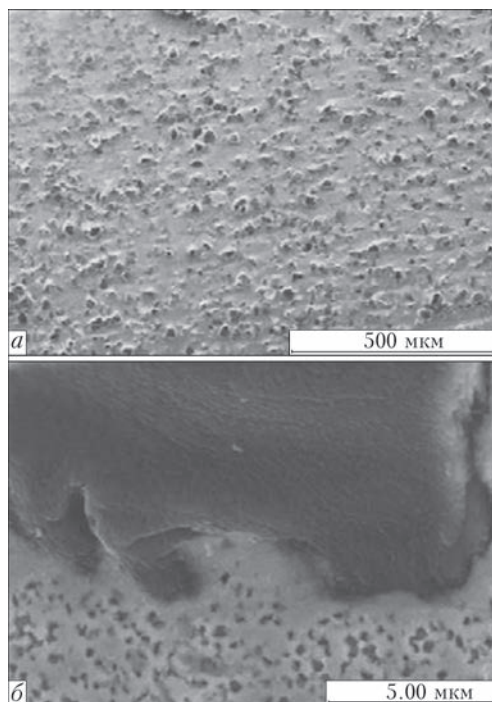


Рис. 14. Микроструктура алмазного/композитного покрытия Ni60, выполненного SLD



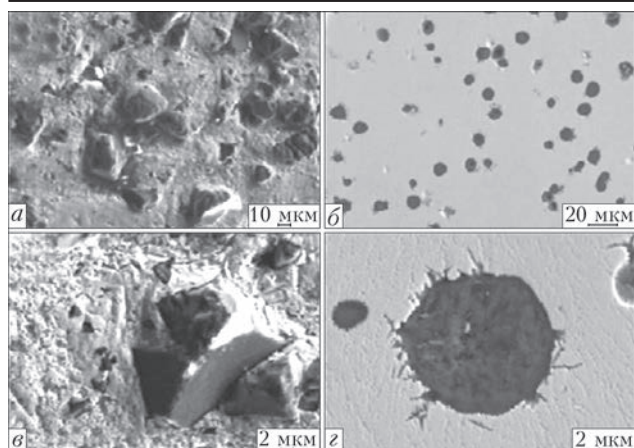


Рис. 15. Сравнение графитизации алмаза; алмазное покрытие Ni60 SLD (а, в) и алмазное покрытие Ni60 LC (б, г)

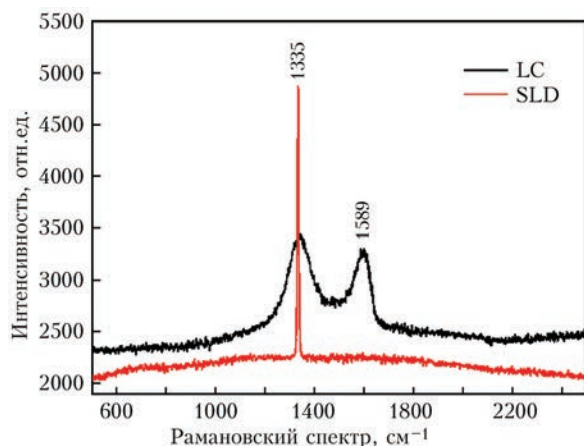


Рис. 16. Рамановские спектры алмазного/композитного покрытия Ni60 SLD и LC

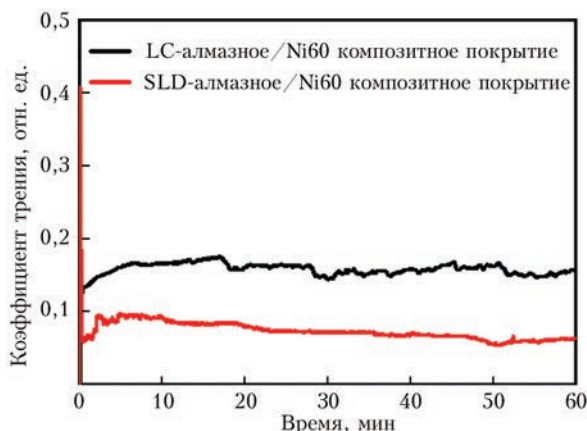


Рис. 17. Изменения коэффициента трения от времени скольжения

напыления, инертная атмосфера  $N_2$  положительно влияют на предотвращение графитизации алмазных частиц во время процесса SLD.

Согласно результатам испытания на износ, как показано на рис. 17, 18, алмазное/композитное покрытие Ni60 имеет отличные трибологические свойства. При циклической нагрузке в процессе износа и резке алмазных частиц неправильной формы, поверхность шлифовального шара  $Si_3N_4$  была сильно истерта. Считается, что трение меж-

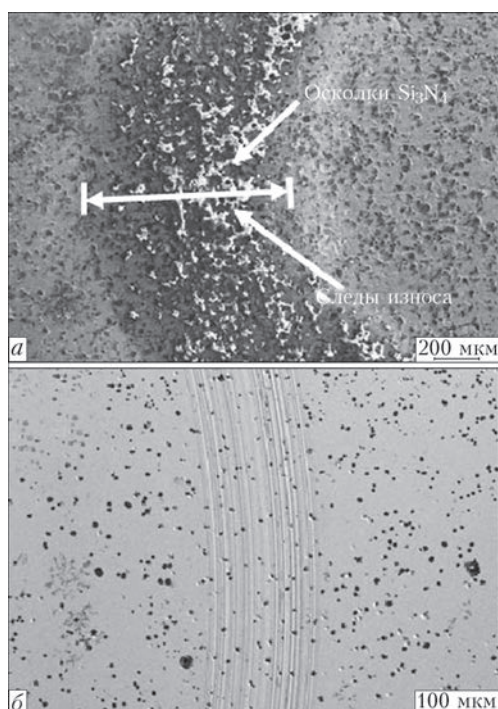


Рис. 18. РЭМ-изображения изношенных поверхностей: а — след износа образца SLD; б — след износа образца LC

ду контактными поверхностями было уменьшено благодаря абразивной устойчивости твердых частиц алмаза неправильной формы. Низкий коэффициент трения и высокая абразивная устойчивость алмазного/композитного покрытия Ni60 уменьшают повреждения поверхности, подверженной износу. Поверхность износа штифта повреждается в результате образования борозд. След износа характеризуется многочисленными прерывистыми, короткими и неглубокими бороздами. Это означает, что износостойкость композитного образца SLD лучше, чем образца LC, так как сцепление границы раздела между алмазными частицами и частицами сплава Ni60 достаточно прочное, чтобы выдержать механическую атаку при износе.

**Перспективы и проблемы.** На основе результатов обзорного исследования, можно сделать вывод, что SLD имеет огромный потенциал для быстрого внедрения технологии, разработанной в лаборатории, разным областям промышленности, таким как автомобилестроение, судостроение, биомедицина, авиационная/аэрокосмическая, энергетическая, нефтехимическая и горнорудная. Кроме того, необходимость снижения высокой стоимости получения покрытий, сокращения этапов для их получения за один проход и повышение функциональных свойств покрытия являются некоторыми из причин того, что способ напыления SLD будет и дальше оставаться в центре внимания как научных, так и промышленных исследований. Для успешного применения технологии SLD в промышленности нужно исследовать не-



которые проблемы прикладного характера, такие как конкретная трибология, сильный абразивный износ, высокотемпературная ползучесть, устойчивость и сильная эрозия.

В дальнейшем следует сконцентрировать внимание на повышении эффективности и функциональности технологии SLD. Эффективность в данном исследовании была ограничена из-за несоответствия лазерного пятна пятну напыления порошка и неравномерного распределения нагрева (гауссов профиль нагрева) на участке напыления. Использование более мощного лазера смогло бы увеличить лазерное пятно до размера пятна напыления порошка, а эффективность напыления должна быть исследована при более высоких скоростях подачи и осаждения. Если применять лазерный луч прямоугольного профиля, то можно ожидать более равномерного распределения температуры, что позволит увеличить плотность напыления и, таким образом, улучшить управление процессом. Следует исследовать использование более высоких скоростей частиц, применяя газовый нагрев, или усовершенствованную конструкцию сопел; следует ожидать улучшения эффективности напыления, плотности и механических свойств.

*Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку Китайскому Национальному Фонду Естествознания (51475429), Чжэцзянскому Проекту Прикладных Исследований Технологий Провинциального Содружества (2014C31122), а также Исследовательскому Проекту Доктора-антуну Провинции Дзеджан (Z42102002).*

1. Bray M., Cockburn A., O'Neill W. The laser-assisted cold spray process and deposit characterization // Surface & Coating Technology. – 2011. – № 203. – P. 2851–2857.
2. High speed titanium coating by supersonic laser deposition / R. Lupoi, M. Sparkes, A. Cockburn, W. O'Neill // Materials Letter. – 2011. – № 65. – P. 3205–3207.
3. Solid-state manufacturing of tungsten deposits onto molybdenum substrates with supersonic laser deposition / M.

- Jones, A. Cockburn, R. Lupoi et al. // Ibid. – 2014. – № 134. – P. 295–297.
4. Olakanmi E.O., Doyoyo M. Laser assisted cold-spray corrosion- and wear-resistant coatings: a review // J. of Thermal Spray Technology. – 2014. – № 23. – P. 765–785.
5. Kulmala M., Vuoristo P. Influence of process conditions in laser-assisted low pressure cold spraying // Surface & Coatings Technology. – 2008. – № 202. – P. 4503–4508.
6. Beneficial effects of synchronous laser irradiation on the characteristics of cold-sprayed copper coatings / B. Li, L.J. Yang, Z.H. Li et al. // J. of Thermal Spray Technology. – 2015. – № 24. – P. 836–847.
7. Performance comparison of Stellite 6 deposited on steel using supersonic laser deposition and laser cladding / F. Luo, A. Cockburn, R. Lupoi et al. // Surface & Coatings Technology. – 2012. – № 212. – P. 119–127.
8. Beneficial effects of laser irradiation on the deposition process of diamond/Ni60 composite coating with cold spray / J.H. Yao, L.J. Yang, B. Li, Z.H. Li // Applied Surface Science. – 2015. – № 330. – P. 300–308.
9. Microstructure and tribological performance of tungsten carbide reinforced stainless steel composite coatings by supersonic laser deposition / B. Li, J.H. Yao, Q.L. Zhang et al. // Surface & Coatings Technology. – 2015. – № 275. – P. 58–68.
10. Characteristics of performance of hard Ni60 alloy coating produced with supersonic laser deposition technique / J.H. Yao, L.J. Yang, B. Li, Z.H. Li // Materials & Design. – 2015. – № 83. – P. 26–35.
11. Deposition mechanism and microstructure of laser-assisted cold-sprayed (LACS) Al-12 wt. % Si coatings: effect of laser power / E.O. Olakanmi, M. Tlotleng, C. Meacock et al. // JOM. – 2013. – № 65. – P. 776–783.
12. Supersonic laser spray of aluminum alloy on a ceramic substrate / A. Riveiro, F. Lusquinos, R. Comesana et al. // Applied Surface Science. – 2007. – № 254. – P. 926–929.
13. Yuan L.J., Luo F., Yao J.H. Deposition behavior at different substrate temperatures by using supersonic laser deposition // J. of iron and steel research, International. – 2013. – № 20. – P. 87–93.
14. Microstructural and mechanical evaluation of laser-assisted cold sprayed bio-ceramic coatings: potential use for biomedical applications / M. Tlotleng, E. Akinlabi, M. Shukla, Pityana // J. of Thermal Spray Technology. – 2015. – № 24. – P. 423–435.
15. Simulation analysis of Stellite 6 particle impact on steel substrate in supersonic laser deposition process / F. Luo, A. Cockburn, D.B. Cai et al. // Ibid. – 2015. – № 24. – P. 378–393.
16. Effects of diamond size on the deposition characteristics and tribological behavior of diamond/Ni60 composite coating prepared by supersonic laser deposition / L.J. Yang, B. Li, J.H. Yao, Z.H. Li // Diamond and Related Material. – 2015. – in press.

Поступила в редакцию 23.01.2016

## Международная конференция Немецкого союза сварки и родственных процессов DVS «Современные тенденции в сварке и соединительных технологиях в 21-ом веке»

Языки конференции: русский, английский, эстонский

Наш первый контакт для Вас, пожалуйста, свяжитесь с нами:

1. Frau Agne Plenaite agne.plenaite@gsi-baltikum.ee LT, ENG
2. Herr Vladimir Beloi vladimir.beloi@tlmk.ee EE, RUS
3. Herr Ilgonis Rungis irungis@3arodskola.lv LV, RUS
4. Frau Irina Pinneker pinneker@slv-rostock.de DE, RUS
5. Herr Sergei Boaga sergei.boaga@gsi-baltikum.ee EE, RUS
6. Herr Dr. Groß hans-g.gross@gsi-baltikum.ee DE, RUS, ENG



# ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ К ОТПУСКНОЙ ХРУПКОСТИ ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

**В.Ю. СКУЛЬСКИЙ<sup>1</sup>, В.В. ЖУКОВ<sup>1</sup>, М.А. НИМКО<sup>1</sup>, С.И. МОРАВЕЦКИЙ<sup>1</sup>, Л.Д. МИЩЕНКО<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ПАО «Турбоатом», 61037, г. Харьков, пр-т Московский, 199. E-mail: office@turboatom.com.ua

Охарактеризована сущность проблемы образования трещин при отпуске. Показано, что условием зарождения таких трещин является низкая пластичность металла в период развития пластической деформации, вызванной релаксацией напряжений. В этих условиях важным охрупчивающим фактором является временно развивающееся вторичное твердение, связанное с процессом зарождения и выделения в матрице вторичных фаз. Поскольку различные по легированию стали в процессе отпуска ведут себя по-разному, в каждом конкретном случае представляет интерес оценка их возможной склонности к отпускной хрупкости. Описана методика высокотемпературных испытаний на растяжение, позволяющая оценивать пластические свойства металла в различных условиях отпуска. Склонность к отпускной хрупкости оценивали с использованием критерия величины относительного сужения  $\psi \leq 25\%$ . Исследован характер изменения пластичности сложнолегированных теплоустойчивых сталей при различных режимах отпуска, приводящих к состоянию вторичного твердения и после стадии твердения. Показано, что в период развития твердения стали имели низкую пластичность с характерным для такого состояния межзеренным разрушением. Определены критические режимы отпуска, при которых достигается состояние высокой пластичности, на основании чего можно судить об отсутствии склонности к отпускным трещинам. Библиогр. 9, табл. 1, рис. 8.

*Ключевые слова:* стали закаливающиеся, отпуск, трещины, вторичное твердение, пластичность при отпуске, условие высокой пластичности

Образование трещин в процессе отпуска или при повторном нагреве в термически упрочняемых сталях и их сварных соединениях является следствием сочетания трех факторов — структурного (обусловленного вторичным твердением), охрупчивающего (связанного с выделением на границах зерен вторичных фаз и сегрегаций примесей) и силового (в виде напряжений, вызванных образованием закалочных структур, усадкой металла либо приложенной внешней нагрузкой).

Силовой фактор, в основе которого лежит энергия упругих искажений, накопленных в кристаллической системе, при нагреве вызывает развитие релаксационной пластической деформации. В условиях пониженной пластичности, обусловленной вторичным твердением, деформация приобретает локальный характер — концентрируется на границах зерен или в области более податливых (мягких) структурных составляющих. Малый ресурс пластичности таких участков и дополнительная сегрегация примесей повышают вероятность зарождения микродефектов и образования трещин.

Трещины имеют малые размеры и, располагаясь внутри металла, могут остаться невыявленными, если неразрушающий контроль был выполнен до проведения завершающей термической обработки. Поэтому представляется важным заранее — до изго-

товления промышленных изделий — устанавливать возможность и условия образования таких трещин для принятия профилактических мер.

В исследовательской практике применяют различные методы проверки склонности сталей и их сварных соединений к охрупчиванию и образованию трещин при отпуске. Могут быть использованы как маломерные образцы из однородного металла, так и образцы, вырезанные из сварных соединений. В ряде случаев для испытаний требуется специальная оснастка или оборудование. Более удобными и менее затратными по времени являются экспериментальные методы, позволяющие исключить из цикла подготовки операции, связанные со сваркой, и использовать простые в изготовлении образцы малых размеров. Таким методом может быть высокотемпературное испытание на растяжение [1–3]. При этом критерием охрупчивания может служить величина относительного сужения  $\psi = 25\%$  [3]: при меньших значениях металл склонен к отпускным трещинам. В более ранней работе А.Г. Винкер и А.В. Пенс [4] определили в качестве порогового значения  $\psi = 20\%$ .

Цель настоящей работы заключалась в изучении влияния режимов отпуска предварительно закаленных энергомашиностроительных сталей на отпускную хрупкость с применением метода высокотемпературных испытаний на растяжение.

Испытания проводили на установке Gleeble 380. Использовали цилиндрические образцы диаметром 10 мм с резьбовыми частями на концах для их закрепления в нагружающих захватах. Нагрев по заданному режиму осуществляли с помощью тока, пропускаемого через образец от подсоединяемых к нему медных прижимов. Для гарантированного разрушения в рабочей части (между прижимами) образцы в центре имели проточку меньшего диаметра (6 мм). В качестве опытных материалов использовали литую, ковкую и горячедеформированную теплоустойчивые стали ПЗ (15Х2М2ФБС), ЭИ415 (20Х3ВМФА) и Р91 (Х10СгМоVNb91 (типа 10Х9МФБ)). Термовременные диаграммы, ограничивающие области вторичного твердения, строили по результатам измерения твердости после различных режимов отпуска (различной выдержки при различных температурах) предварительно закаленных образцов. В данных опытах для стали Р91 использовали образцы металла швов с аналогичной системой легирования; полученные экспериментальные диаграммы твердения служили ориентиром для выбора условий последующих испытаний на растяжение с использованием образцов из горячедеформированной трубной стали. Применительно к испытаниям на растяжение при выбранных температурах применен следующий подход. Известно, что трещины отпуска образуются в результате медленно развивающейся пластической деформации — релаксационной ползучести (по данным работы [2] скорость деформации (относительного удлинения, %) составляет  $10^{-4} \dots 10^{-5} \%$ /ч). В таких условиях деформация инициирует выделение карбидных фаз, вызывающих охрупчивание границ зерен [5], и, предположительно, становится возможным перемещение примесных атомов вместе с движущимися дислокациями к границам. В обычных испытаниях на статическое растяжение скорости деформации выше и охрупчивание может не наблюдаться.

Как показали А.В. Дикс и В.Ф. Севедж [6] на примере никелевого сплава, высокотемпературное охрупчивание проявлялось при малых скоростях деформации; при растяжении со скоростью выше 25 мм/мин охрупчивающий эффект ослабевал и металл имел повышенную пластичность. В проводимых в настоящей работе испытаниях также создавали достаточно низкую скорость деформации образцов — скорость перемещения захватов составляла 0,04 мм/мин. Эксперимент включал два цикла нагрева (рис. 1). Первый цикл предусматривал нагрев образца до  $t_{\max} = 1250^\circ\text{C}$  за 5 с, выдержку в течение 15 с и последующее ускоренное охлаждение до комнатной температуры со скоростью в интервале  $600 \dots 500^\circ\text{C}$   $w_{6/5} = 40^\circ\text{C}/\text{с}$ . На этом этапе воссоздавали условие сварочно-

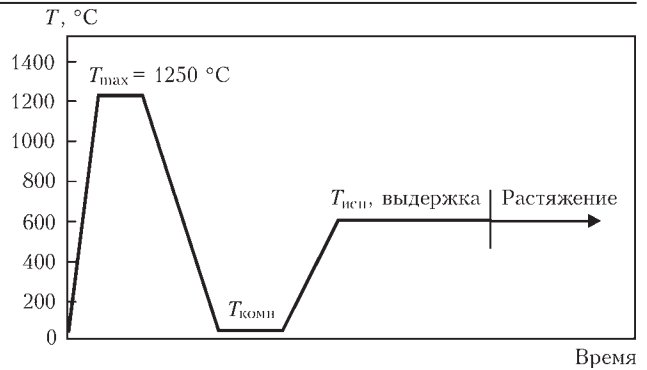


Рис. 1. Температурные циклы при выполнении экспериментов

го нагрева и закалки металла зоны термического влияния. Во время второго цикла выполняли медленный нагрев до требуемой температуры термической обработки (со скоростью  $2^\circ\text{C}/\text{с}$ ), выдержку при установленной температуре в течение также предварительно выбираемого времени и затем производили деформацию образца (при этой же температуре). Температуру и выдержку устанавливали исходя из термовременных границ областей вторичного твердения. В одних случаях испытывали образцы после термической обработки, соответствующей достижению состояния твердения и, следовательно, низкой пластичности. В других — после режима обработки, обеспечивающего выход из области твердения, когда металл должен становиться более пластичным. За критерий выбран более «жесткий», по сравнению с критерием А.Г. Винкера и А.В. Пенса, показатель  $\psi = 25\%$ . В экспериментах тепловой режим обработки оценивали с помощью параметра Ларсона–Миллера  $P_{\text{LM}}$ , который одновременно учитывает как абсолютную температуру  $T$  (в градусах Кельвина), так и время теплового воздействия на металл  $\tau$ , ч:  $P_{\text{LM}} = T(20 + \lg(\tau))$ .

Предварительно проведенные исследования склонности ко вторичному твердению представлены на рис. 2. Зафиксированные области твердения имеют различные термовременные пределы. Общим является их сужение и смещение к малым длительностям выдержки с повышением температуры, что обусловлено усилением термической активации диффузии атомов в кристаллической системе, быстрым зарождением, выделением и укрупнением карбидных и карбонитридных фаз (в зависимости от систем легирования сталей) и, как следствие, быстрым переходом к стадии разрупрочнения твердого раствора.

Режимы термической обработки образцов приведены в таблице. Позиции I и II соответствуют испытаниям в состоянии твердения и вне областей твердения.

Результаты показали, что в состоянии вторичного твердения металл склонен к хрупкому разрушению. Полученные в этих условиях значения  $\psi$  находились



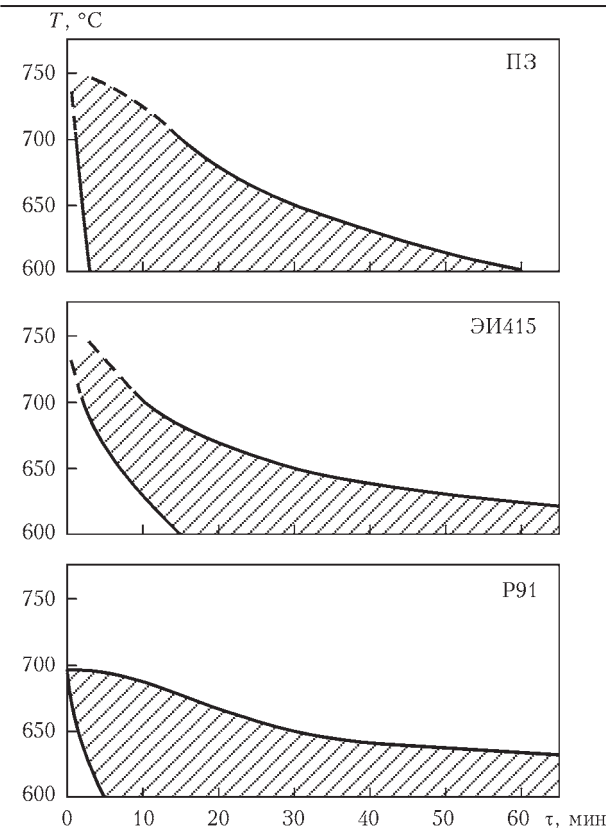


Рис. 2. Диаграммы вторичного твердения

на весьма низком уровне — в пределах 1,7...6 %. Образцы разрушались практически без утонения с характерным для такого состояния преимущественно межзеренным изломом\* (рис. 3).

Как показано на рис. 4, низкая пластичность сохраняется в определенных интервалах термовременных параметров  $P_{LM}$  как в пределах областей вторичного твердения, так и за их границами. Граничные значения  $P_{LM}^F$  (наклонные штриховые линии), рассчитанные по диаграммам твердения, составляют: у сталей ПЗ и ЭИ415 в интервале 700...600 °C —  $(17,5...18,9) \cdot 10^3$  и  $(17,7...18,7) \cdot 10^3$  соответственно, у стали Р91 в интервале 550...500 °C —  $15,8...16,2 \cdot 10^3$ .

В отличие от сталей ЭИ415 и Р91, у которых значения  $\psi$  за пределами области твердения начинают возрастать, у стали ПЗ пластичность в некотором интервале режимов запредельного отпуска остается весьма низкой. Так, во время испытания при 700 °C после выдержки до 40 мин, что явно превышает оцененное экспериментально время завершения стадии твердения (около 15 мин), относительное сужение образцов из стали ПЗ оставалось на начальном низком уровне. Вероятно, в данном случае мог проявиться дополнительный вклад процесса активирования выделения карбидных фаз пластической деформацией в развитие твердения [5]. Это могло привести к смещению границ обла-

\* В металлографических исследованиях принимала участие Т.А. Алексеенко.

Режимы термической обработки образцов

Сталь	Группа испытаний	№ образца	Отпуск $t, ^\circ\text{C}/\tau, \text{мин}$	$P_{LM} \cdot 10^{-3}$
15X2M2ФБС (ПЗ)	I	1	600/20	17,04
		2	700/15	18,87
		3	700/15	18,87
	II	4	700/40	19,29
		5	740/20	19,78
		6	760/60	20,66
		7	750/100	20,69
		8	750/180	20,95
		9	780/60	21,06
20X3МВФ (ЭИ415)	I	1	600/20	17,04
		2	700/15	18,87
	II	3	700/40	19,29
		4	700/60	19,46
		5	740/100	20,48
		6	740/180	20,74
X10CrMoVNb91 (Р91)	I	1	520/20	15,48
		2	600/20	17,04
	II	3	600/20	17,04
		4	700/15	18,87
		5	760/10	19,86

сти твердения в сторону больших выдержек относительно их положения, установленного на основании измерений твердости. Также не исключается возможность вклада в дополнительное твердение и сдерживание улучшения пластичности процесса выделения при повышенной температуре (и деформации) карбидов иного типа [5, 7–9].

В целом же у исследованных сталей после завершения стадии твердения происходит возрастание высокотемпературной пластичности (рис. 4). Причем у стали Р91\*\* этот переход происходит

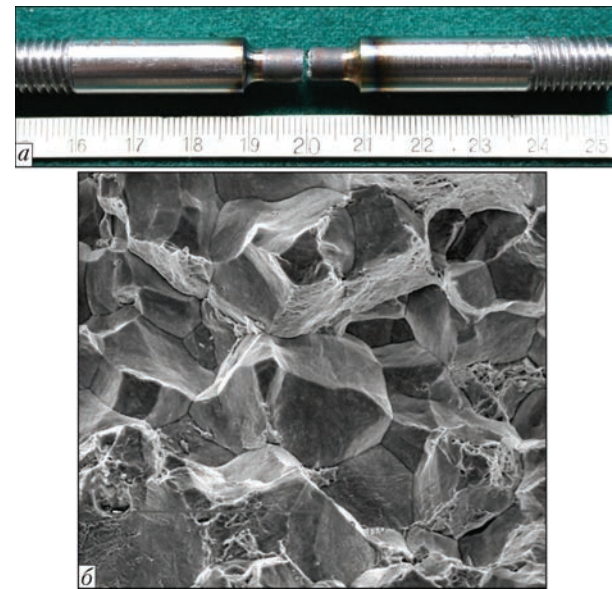


Рис. 3. Характер разрушения образца в условиях развития в металле вторичного твердения: а — образец после испытания; б — поверхность разрушения ( $\times 600$ )

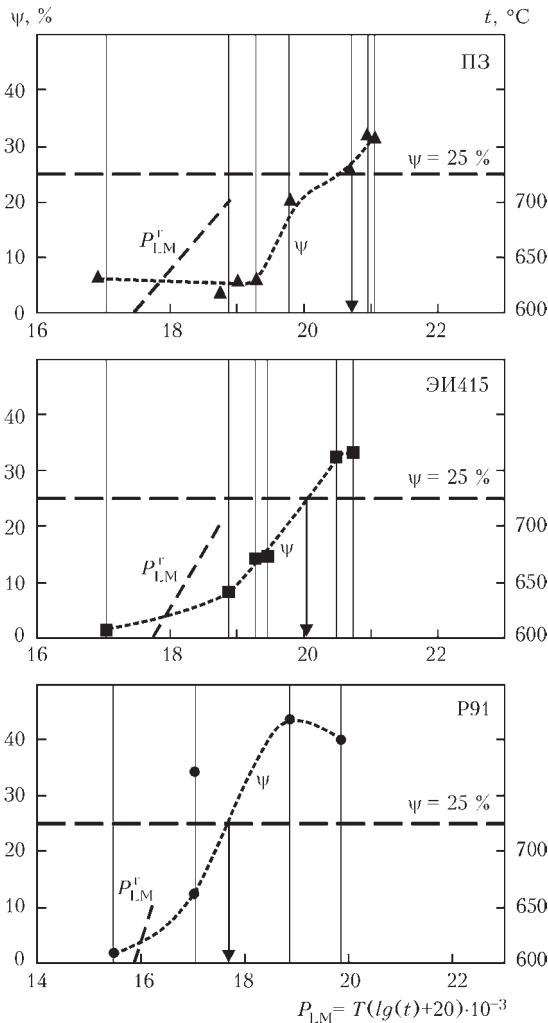


Рис. 4. Изменение относительного сужения  $\psi$  в зависимости от  $P_{LM}$  и связь термовременной границы областей твердения  $P_{LM}^r$  с температурой отпуска  $t$

более резко — при меньших значениях и в более узком диапазоне параметра  $P_{LM}$ . В этих условиях относительное сужение возросло до более высокого уровня (не ниже 40 % при  $P_{LM} \approx (18,9...19,9) \cdot 10^3$ ), чем у сталей ПЗ и ЭИ415. Последние были более «инертными» в процессе перехода от пониженной к высокой пластичности. Максимальные значения  $\psi$  достигли меньшего

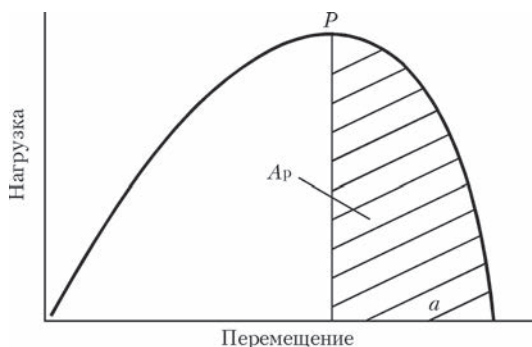


Рис. 5. Схема диаграммы растяжения и рассчитываемая площадь, соответствующая работе распространения разрушения  $A_p$

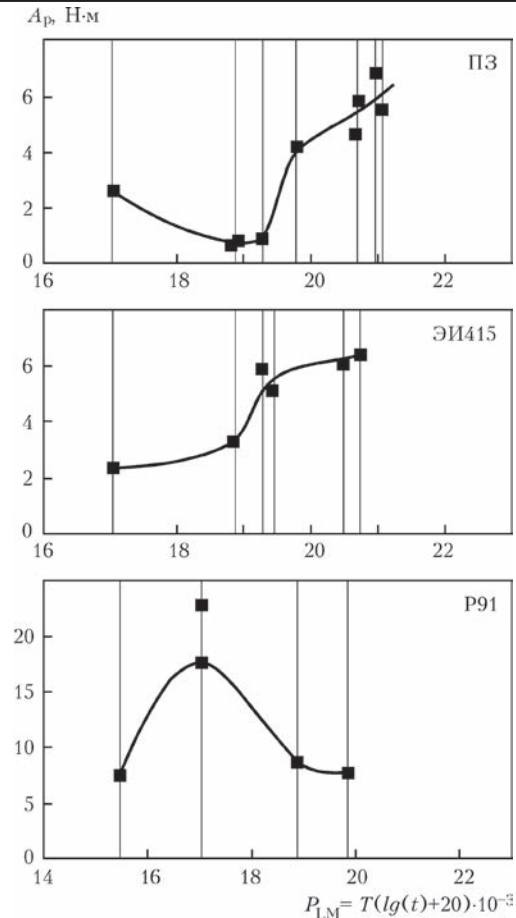


Рис. 6. Расчетные значения работы разрушения  $A_p$

уровня и при больших значениях параметра  $P_{LM}$ : 32...33 % при  $P_{LM} \approx 30 \cdot 10^3$  у стали ПЗ и 33...34 % при  $P_{LM} = (25...27) \cdot 10^3$  у стали ЭИ415. По полученным экспериментальным кривым определены следующие критические значения параметра отпуска  $P_{LM}$ , при которых достигается критериальное относительное сужение 25 %:  $20,7 \cdot 10^3$  для литой стали ПЗ,  $20 \cdot 10^3$  для ковальной стали ЭИ415 и  $17,6 \cdot 10^3$  для горячекатаной трубной стали Р91.

Энергетической характеристикой сопротивления разрушению может служить работа распространения трещины, которая зарождается в образце после достижения определенной нагрузки (напряжения). Мерой работы распространения трещины  $A_p$  является площадь под частью диаграммы разрушения после момента появления трещины. Однако определение такой характеристики по диаграмме растяжения является неточным, поскольку трудно определить напряжение, при котором зарождается трещина. По этой причине проведенную в работе оценку сопротивления металла распространению трещины следует считать приближенной, хотя она и иллюстрирует

\*\* Испытания при 600 °С/20 мин показали большой разброс значений  $\psi$ . В проводимом анализе свойств учитывали более низкое значение, как возможный худший вариант пластичности.

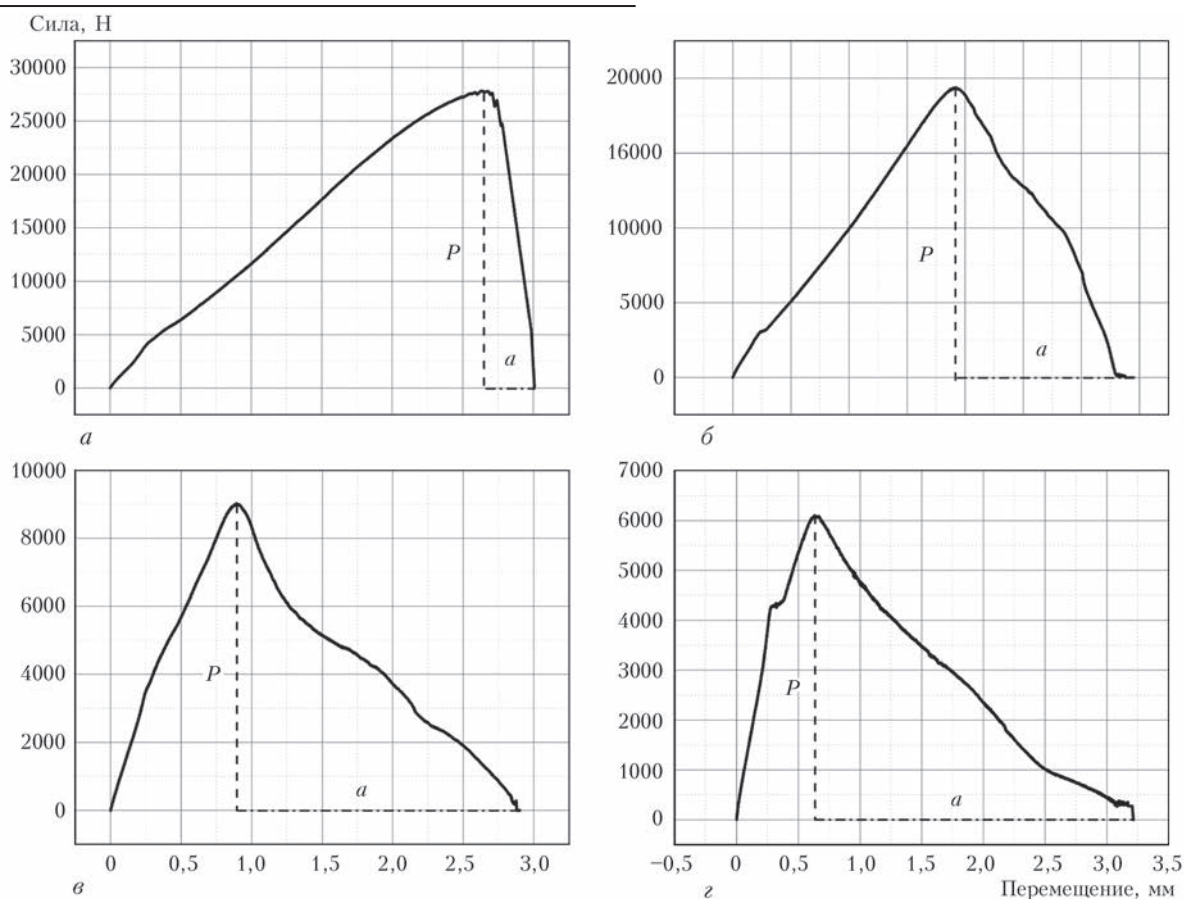


Рис. 7. Диаграммы растяжения образцов из стали Р91 для условий: а —  $P_{LM} = 15,48 \cdot 10^3$ ; б —  $17,04 \cdot 10^3$ ; в —  $18,87 \cdot 10^3$ ; г —  $19,86 \cdot 10^3$

связь с определенными выше показателями пластичности. В данном случае работу распространения трещины оценивали по площади под нисходящей ветвью диаграммы после достижения максимальной нагрузки  $P$  — на участках, соответствующих перемещению  $a$  захватов машины (см. схему на рис. 5). При этом полагали, что на этой стадии в образцах уже имеются очаги разрушения. Соответствующие расчеты площадей (рис. 6) по полученным при испытаниях диаграммам растяжения выполнены методом интегрирования с применением программы Origin 7.5 (Origin Lab Corporation, США).

Сопоставляя указанные результаты и данные на рис. 4 можно отметить, что у сталей ПЗ и ЭИ415 существует некоторая согласованность в изменении работы разрушения и относительного сужения с ростом параметра отпуска  $P_{LM}$ . В случае же стали Р91 характер изменения этих характеристик отличается. Причина наблюдаемых различий заключается в соотношениях величин максимальной (разрушающей) силы  $P$  и фиксируемого перемещения  $a$  на стадии разрушения (рис. 7). Так, в случае начального испытания с параметром  $P_{LM} = 15,48 \cdot 10^3$  металл имел высокую прочность и весьма малое перемещение  $a$ , соответствующее склонности к хрупкому разрушению. Расчетная работа разрушения  $A_p$  составляла

7,5 Н·м. При испытании по режиму с параметром  $P_{LM} = 17,04 \cdot 10^3$  получена максимальная величина  $A_p$ . В этом состоянии возросло перемещение при разрушении, а сила  $P$  сохранилась на высоком уровне. В последних двух испытаниях, невзирая на увеличение значений перемещения, имело место снижение разрушающей силы, что привело к снижению результирующих значений  $A_p$ . Можно предположить, что такое поведение стали определяется особенностями структурных изменений, развивающихся при отпуске и высокотемпературной деформации.

Большая степень согласованности с характером изменения  $\psi$  имеет место при использовании в качестве характеристики сопротивления хрупкому разрушению не работы разрушения, а составляющей этой расчетной величины — перемещения захватов машины  $a$  на стадии разрушения (рис. 8). Из последних зависимостей следует, что высокое сопротивление исследованных сталей образованию трещин повторного нагрева достигается при таком их состоянии, при котором перемещение  $a$  при испытании на растяжение в процессе отпуска превышает 1,2...1,5 мм (1,5, 1,2 и 1,5 мм для сталей ПЗ, ЭИ-415 и Р91 соответственно, определено для условий, указанных стрелками критическим значениям параметра  $P_{LM}$ ).



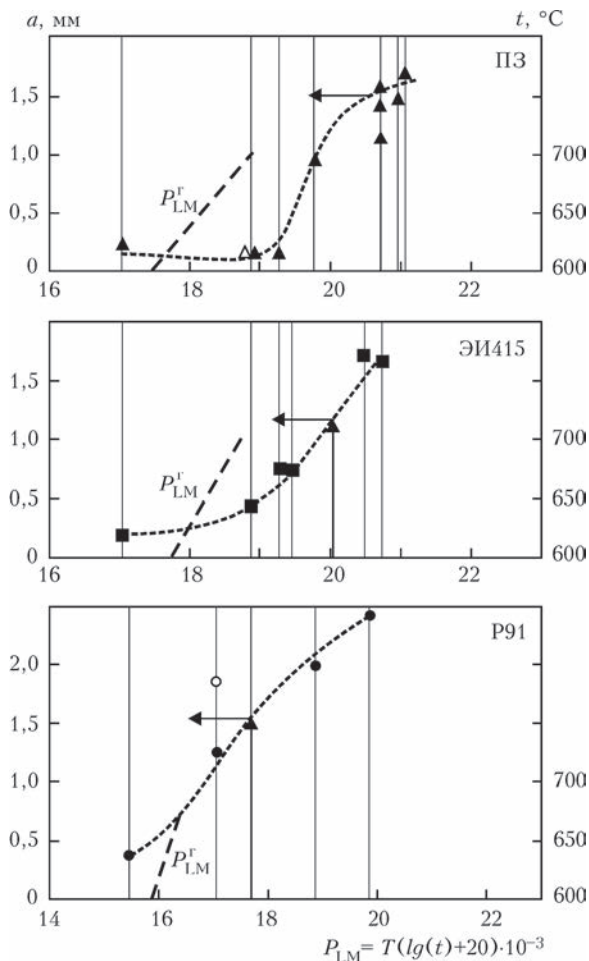


Рис. 8. Влияние режимов отпуска на величину перемещений  $a$  на стадии разрушения

В заключение заметим, что вторичное твердение может периодически проявляться в различные периоды отпуска. В приведенных исследованиях склонности к твердению после первой (рассмотренной выше) стадии фиксировались волнистые изменения твердости (увеличение и уменьшение) при более длительных выдержках. Однако такие временные повышения значений твердости были незначительными на фоне уже достигнутого общего разупрочнения твердого раствора. В данной работе уделено внимание первой стадии твердения, выявляемой в процессе относительно коротких выдержек (до ~3 ч). Интерес к этому периоду обусловлен тем, что именно в начале отпуска развивается релаксация напряжений, что в условиях деградации пластичности вследствие твердения ведет к повышению вероятности образования микродефектов.

## Выводы

1. Определены термовременные области развития вторичного твердения в условиях высоко-го отпуска сталей 15X2M2ФБС, 20X3BMФА и X10CrMoVNb91, предварительно закаленных при имитационном термическом цикле сварки. Внешние границы областей твердения соответствуют следующим значениям параметра Ларсона–Миллера  $P_{LM}$ :  $(17,5...18,9) \cdot 10^3$  и  $(17,7...18,7) \cdot 10^3$  для сталей ПЗ и ЭИ415 в интервале 700...600 °C,  $(15,8...16,2) \cdot 10^3$  для стали P91 в интервале 550...500 °C.

С помощью представленного в работе метода высокотемпературных испытаний на растяжение проиллюстрирован характер изменения пластичности в зависимости от режимов отпуска и состояния исследованных сталей. Показано, что в условиях вторичного твердения стали обладают низкой пластичностью и склонны к хрупкому межзеренному разрушению.

2. Используя в качестве критерия склонности к высокотемпературной хрупкости величину относительного сужения  $\psi \leq 25\%$ , установлены режимы отпуска, при которых достигается высокая пластичность и исключается вероятность образования трещин повторного нагрева: для стали ПЗ —  $P_{LM} \geq 20,7 \cdot 10^3$ , для стали ЭИ415 —  $P_{LM} \geq 20 \cdot 10^3$  для стали P91 —  $P_{LM} \geq 17,6 \cdot 10^3$ .

1. Prager M., Sines G. Embrittlement of precipitation hardenable nickel-base alloy by oxygen // Transactions of ASME. – 1971. – **93**, № 2. – P. 112–119.
2. Земзин В.Н., Шпон Р.З. Термическая обработка и свойства сварных соединений. – Л.: Машиностроение, 1978. – 367 с.
3. Титова Т.И., Шульган Н.А., Боровской А.С. Современные требования, предъявляемые к сварочным материалам для сварки нефтехимических сосудов давления, изготавливаемых из стали типа 2,25Cr–1Mo–0,25V // Сб. тр. науч.-техн. конф. «Сварочные материалы-2012». – С.-Петербург: Из-во политех. у-та, 2012. – С. 192–201.
4. Vinkier A.G., Pense A.W. A review of underclad cracking in pressure-vessel components // WRC Bulletin. – 1974. – № 197, August. – 35 p.
5. The mechanism of stress-relief cracking in a ferritic Alloy Steel / J.G. Nawrocki, J.N. DuPont, C. V. Robin et al. // Welding J. – 2003. – **82**, № 2. – P. 25–35.
6. Dix A.W., Savage W.F. Factors Influencing Strain-Age Cracking in Inconel X-750 // Welding J. – 1971. – **50**, № 6. – P. 247–252.
7. Природа тепловой хрупкости сталей оборудования АЭС и методы ее снижения / М.И. Оленин, В.И. Горынин, Б.Т. Тимофеев и др. // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 3. – С. 167–173.
8. Lundin C.D., Khan K.K. Fundamental studies of metallurgical causes and mitigation of reheat cracking in 11/4Cr–1/2Mo and 21/4Cr–1Mo steels // WRC Bulletin. – 1996. – № 409, February. – 117 p.
9. Ланская К.А. Высокохромистые жаропрочные стали. – М.: Металлургия, 1976. – 216 с.

Поступила в редакцию 05.11.2015

## ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ИНСТИТУТА СВАРКИ В ГЛИВИЦАХ В ОБЛАСТИ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ ДЛЯ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Я. ПИЛЯРЧИК

Ин-т сварки. 44-100, Гливице, ул. Бл. Чеслава 16-18, Польша. E-mail: is@is.glivice.pl

Институт сварки в Гливицах является в Польше самым большим и очень важным научно-исследовательским центром, который проводит работы по исследованию, развитию и внедрению во всех областях и направлениях сварочного производства, что очень помогает в процессе обучения и подготовки кадров. Научные сотрудники Института, которые десятилетиями работают во многих областях сварочного производства, совмещают в рамках своих специальностей глубокие теоретические знания с огромным лабораторным опытом и ценными результатами практического сотрудничества с промышленными предприятиями, благодаря этому всецело удовлетворяют требованиям, выдвигаемым к преподавателям наивысшего уровня. Библиогр. 3, табл. 1.

*Ключевые слова:* сварочное производство, подготовка кадров, гармонизация, европейские и международные системы, центры подготовки и надзора, локальные обучающие центры

Учебно-подготовительная деятельность Института сварки в Гливицах [1] проводится в нескольких главных направлениях:

- обучение и подготовка сварочного персонала (инженеров, технологов и мастеров по сварке, а также сварщиков) в рамках гармонизированных европейской и международной систем;
- обслуживание и надзор внутренней системы подготовки сварщиков в локальных учебных центрах;
- подготовка персонала в области неразрушающих методов контроля, охватывающая все наиболее важные методы и способы;
- курсы по неразрушающим методам контроля в области железнодорожного транспорта;
- различные специальные курсы.

**Подготовка сварочного персонала в рамках гармонизированных европейской и международной систем.** Эта подготовка проводится в тесном сотрудничестве с:

– Европейской сварочной федерацией (31 член) — EWF (European Federation for Welding, Joining and Cutting, ранее: European Welding Federation) [2], основанной в 1992 г. после образования Европейского Союза. Главным заданием EWF была разработка гармонизированной системы обучения и подготовки (The Harmonised Education and Training System) кадров для сварочного производства на высшем, среднем и профессиональном уровнях, которая позволила бы обеспечить выдачу документов единого образца, которые были бы безоговорочно признаны во всех странах-членах без необходимости проверки знаний и навыков лиц, прошедших обучение.

– Международным институтом сварки (56 членов) — МИС (IIW — International Institute of Welding) [3], основанном в 1947 г., а включенном в гармонизированную систему подготовки сварочного персонала в 2000 г., когда было принято решение о создании Международного уполномоченного органа — IAB (International Authorization Board), охватывающего две группы: группу А по вопросам обучения, подготовки и аттестации (Group A: Education, Training & Qualification) и группу В по внедрению системы и признанию полномочий (Group B: Implementation & Authorization). Образовано международную группу аудиторов (Lead & Peer Assessors). В странах, которые вошли в систему, образованы Уполномоченные национальные органы (Authorised National Bodies): IIW-ANBs и IIW-ANBCCs, точно такие же, какие функционируют в EWF.

Уполномоченные национальные органы экзаминируют и аттестуют лица, окончившие подготовительные курсы, которые проводят утвержденные этими организациями обучающие органы — ATBs — Approved Training Bodies.

Гармонизированная система обучения, аттестации и сертификации персонала, ответственного за надзор над сварочными процессами, в настоящее время базируется на Рекомендациях Международного института сварки. Основной документ IAB 252 от 2007 г., который предопределяет принципы функционирования системы, подвергается систематическому пересмотру в последующих изданиях.

В настоящее время статус IIW-ANB имеют институты и сварочные организации в следующих странах (в алфавитном порядке согласно названий

на английском языке): Австралия, Австрия, Бельгия, Бразилия, Болгария, Канада, Хорватия, Республика Чехия, Дания, Финляндия, Франция, Германия, Венгрия, Индия, Индонезия, Иран, Италия, Япония, Нигерия, Норвегия, Китай, Польша, Португалия, Корея, Румыния, Россия, Сербия, Сингапур, Словакия, Словения, ЮАР, Испания, Швеция, Швейцария, Таиланд, Голландия, Турция, Украина и Великобритания.

Международная и европейская система гармонизированной подготовки, аттестации и сертификации персонала охватывает следующие уровни:

Персонал, ответственный за надзор над сваркой:

- International/European Welding Engineer (Международный/Европейский инженер по сварке);
- International/European Welding Technologist (Международный/Европейский технолог по сварке);
- International/European Welding Specialist (Международный/Европейский специалист по сварке);
- International/European Welding Practitioner (Международный/Европейский практик по сварке).

Остальной персонал:

- International/European Welder (Международный/Европейский сварщик);
- International/European Welding Inspection Personnel (Международный/Европейский инспектор по сварке): С — comprehensive (полный), S — standard (стандартный) и В — basic (базовый).

Знания и дипломы, полученные в рамках гармонизированной системы подготовки, позволяют найти работу на открытом рынке труда во всех странах мира. Наличие всесторонне обученного сварочного персонала, имеющего соответствующие документы, подтверждающие получение специальных знаний, имеет фундаментальное значение в странах, занимающихся производством стальных конструкций в большом объеме. К таким странам принадлежит также Польша, которая в области производства стальных сварных конструкций занимает в настоящее время второе место в Европе (после Федеративной Республики Германии). В Польше производится более половины стальных катаных изделий, которые затем перерабатываются на сварные конструкции и изделия. В общей сложности в Польше производится более 1 млн т сварных конструкций, из которых около половины идет на экспорт.

Как уже говорилось выше, в Польше надзор над системой международной гармонизированной подготовки в области сварки осуществляет ANB — Уполномоченный национальный орган, которым является Институт сварки в Гливицах, а

точнее созданный в Институте Центр по сертификации. Подготовка ведется в АТВ — Обучающих органах (Центрах), утвержденных ANB. Первым АТВ в Польше был Центр по сварочной подготовке и надзору Института сварки. Этот Центр имеет полномочия по проведению обучения на всех уровнях, начиная с инженеров по сварке, а заканчивая сварщиками.

В самых смелых прогнозах не предполагалось, что, начиная с 1997 г., деятельность в области обучения и подготовки сварочного персонала будет востребована в таком большом объеме и будет проводиться для такого широкого круга заинтересованных лиц. Видя возрастающее количество желающих, Институт пригласил к сотрудничеству польские высшие учебные заведения, в которых проводилось обучение по сварочным специальностям. На основании официальных соглашений между ректорами этих вузов и директором Института сварки статус АТВ в области подготовки инженеров по сварке (IWE/EWE) получили:

- Вроцлавская политехника, механический факультет, Институт технологии машин и автоматизации, отдел сварки;
- Гданьская политехника, механический факультет, кафедра технологии материалов для машин и сварочного производства;
- Западноприморский технологический университет в Щетине, факультет механической инженерии и мехатроники, отдел сварки;
- Ченстоховская политехника, факультет механической инженерии и информатики, отдел сварки;
- Технологично-природоведческий университет в Быдгощи, факультет механической инженерии;
- Варшавская политехника, факультет инженерии производства;
- Краковская политехника, механический факультет, Институт инженерии материалов.

Одновременно создано несколько АТВ для подготовки сварщиков и среднего персонала по сварке в различных обучающих центрах на территории всей страны.

Количество международных дипломов, выданных в 1999–2014 гг. в сумме составило 3558 шт., из них IWE — 2080; IWT — 247; IWP — 197; IWS — 524; IW — 31; IWIP — 479.

Количество европейских дипломов, выданных в 1997–2014 гг., составило 1620. Из них EWE — 1120; EWT — 179; EWP — 158; EWS — 72; EW — 91.

**Центр по сварочной подготовке и надзору.** Действующий в Институте сварки на протяжении 25 лет Центр по сварочной подготовке и надзору был создан после 1990 г. прежде всего с целью проведе-



ния гармонизированного европейского обучения. Однако начало деятельности Центра было инициировано значительно раньше и совпадает с моментом создания Института в 1945 г., когда учрежденный существующей властью Государственный сварочный институт получил единственное, но не терпящее промедления задание по подготовке газовых и электросварщиков, которые в то время были очень нужны для восстановления Польши, серьезно разрушенной в результате боевых действий во время Второй мировой войны.

Европейское обучение необходимо было проводить на соответствующем высоком уровне. В этой связи Центр был спроектирован и организован с большим размахом и использованием значительных денежных средств при огромном усилии многих сотрудников Института. Помещения Центра выглядят привлекательно, а его богатое техническое оснащение неразрывно связано с оборудованием и аппаратурой целого Института. Благодаря этому Центр удовлетворяет всем требованиям, выдвигаемым в отношении современного сварочного обучения в полном объеме теоретических и практических требований на наивысшем уровне.

Центр по сварочной подготовке и надзору является интегральным организационным звеном Института и подчиняется непосредственно директору Института. Действует на основании общего устава, организационного устава Института и собственного устава. Деятельность Центра контролирует Научный совет Института. Институт сварки состоит в списках непубличных учреждений непрерывного обучения и в Реестре обучающих заведений.

Центр впервые получил полномочия и статус польского АТВ в 1996 г.; действие полномочий систематически продлевается.

Основной деятельностью Центра является непрерывное обучение персонала для сварочного производства. В Центре организована и проводится специальная подготовка сварочного персонала на всех уровнях в соответствии с программами MIS и EWF: I/EWE, I/EWT, I/EWS, I/EWP и I/EWIP. При проведении курсов IWE (EWE) Центр использует помощь АТВ в польских высших технических заведениях, которые проводят обучение, вытекающее из содержания программ в частях I, II и III. Завершающая фаза последней части (III), охватывающей лабораторные занятия и демонстрации современного сварочного оборудо-

вания, проходят в Центре и на территории целого Института.

Другие формы деятельности Центра в области обучения и подготовки кадров — это обслуживание и контроль польской системы подготовки сварщиков в локальных обучающих центрах на территории всей страны, курсы в области неразрушающих методов контроля и специальные курсы.

**Обслуживание и контроль польской системы подготовки сварщиков в локальных обучающих центрах.** Институт сварки занимался подготовкой сварщиков в течение нескольких первых лет своей деятельности. Затем подготовку сварщиков освоили многочисленные обучающие центры, разбросанные по территории всей страны. Качество этой подготовки было разное, не существовало способа помощи более слабым центрам, не было единой системы выдачи документов и внедрения новых принципов подготовки сварщиков в соответствии с требованиями разрабатываемых европейских стандартов, применяемых в других странах. С целью помощи обучающим центрам и одновременно обеспечения соответствующего уровня подготовки сварщиков в Польше, Институт принял решение по проведению следующих работ:

- предметный надзор над подготовкой сварщиков во всей Польше (обучение проводится в соответствии с национальными программами);
- аттестация польских центров по подготовке сварщиков (в Польше существует более 400 таких центров);
- проверка экзаменаторов, проводящих экзамены, на основании полномочий, выданных Институтом сварки (в Польше имеется около 160 таких экзаменаторов);
- выдача документов сварщикам на основании экзаменационных протоколов, присылаемых в Институт сварки:
  - свидетельство квалификационного экзамена сварщика по PN-EN 287-1 или PN-EN ISO 9606 в версии англо- или немецкоязычной для выпускников курсов сварки угловых швов или курсов сварки листовой стали и труб;
  - свидетельство квалификационного экзамена сварщика по сварке угловых швов или сварщика листовой стали и труб в сварных конструкциях 1, 2 и 3 класса по PN-M-69008, изготавливаемых из листовой стали или труб;
  - удостоверение сварщика.

#### Документы, выданные в период 2004–2014 гг.

Вид документа	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Свидетельство квалификационного экзамена сварщика	20566	22487	34576	42423	43789	46199	44454	42499	45075	52884	52592
Удостоверение сварщика	8740	10580	15474	21524	17604	14736	13918	13662	17378	18234	18390

Количество документов, выданных в период с 2004 по 2014 гг, приведено в таблице. Система надзора хорошо себя зарекомендовала и сегодня. После нескольких десятков лет совершенствования никто не выдвигает претензий в отношении целесообразности ее внедрения.

**Курсы по неразрушающим методам контроля.** Начиная с 2002 г. Центр по сварочной подготовке и надзору проводит подготовку персонала по неразрушающим методам контроля. Курсы проводятся в Институте (в специально созданных лабораториях, оборудованных самой современной аппаратурой для проведения всех методов контроля) и за его пределами (если клиент выражает такое желание) на основании собственных программ, разработанных на основании международных требований. Экзаменирование, аттестация и сертификация курсантов проводится Центром по Сертификации Института в соответствии с требованиями стандарта PN-EN ISO 9712:2012 (до 31.12.2012 это был стандарт PN-EN 473:2008) «Контроль неразрушающий – Аттестация и сертификация персонала по неразрушающему контролю». Выпускники курсов получают сертификаты компетенции и удостоверения специалистов по неразрушающему контролю.

Курсы проводятся для следующих методов неразрушающего контроля: визуальный контроль VT, контроль проникающими веществами (капиллярный) PT, ультразвуковой контроль UT, магнитопорошковый контроль MT, рентгенографический контроль/рентгенографическая оценка швов RT2 ORS и рентгенографический контроль/техника выполнения рентгеновских снимков/оценка RT. Применяются три уровня аттестации персонала по неразрушающему контролю: 1, 2 и 3. В случае уровня 3 курс охватывает часть Basic и основной метод.

Выпускники курсов RT2 ORS могут получить допуск к проведению контроля в промышленном секторе по изготовлению сварных изделий (w), изделий, подвергающихся пластической обработке, кроме поковок (wp) и труб различного диаметра и толщины стенки (t).

Выпускники курсов PT, MT, UT и RT могут получить допуск к проведению контроля в промышленном секторе по изготовлению и секторе по контролю перед и эксплуатационному совместно с изготовлением: сварных изделий (w), отливок (c), поковок (f), изделий, подвергающихся пластической обработке кроме поковок (wp) и труб различного диаметра и толщины стенки (t).

Курсы по неразрушающим методам контроля пользуются большой заинтересованностью на польском рынке, доказательством чего являются статистические данные по количеству слушателей этих курсов.

Количество лиц, прошедших подготовку на курсах по неразрушающим методам контроля: 2004 г. — 727, 2005 — 708, 2006 — 729, 2007 — 864, 2008 — 960, 2009 — 849, 2010 — 982, 2011 — 916, 2012 — 938, 2013 — 927, 2014 — 1220.

Учитывая многочисленные, зачастую очень специфические потребности в области неразрушающего контроля, Институт сварки начал сотрудничество с транспортным техническим надзором (TDT) в Варшаве, следствием которого была разработка курсов по неразрушающему контролю в области железнодорожного транспорта в промышленном секторе «Техническое обслуживание железнодорожного транспорта». В Институте была создана специализированная лаборатория, оборудованная элементами железнодорожных вагонов, которые на практике подвергаются неразрушающему контролю, а также аппаратурой, позволяющей проведение соответствующего метода контроля. Обучение проводится по методам: UT (ультразвуковой контроль), PT (контроль проникающими веществами) и MT (магнитопорошковый контроль) в соответствии с требованиями стандарта PN-EN ISO 9712:2012 (ранее PN-EN 473:2008). Обучение заканчивается экзаменом, проводимым TDT. Сертификаты персонала по неразрушающему контролю выдаются сертифицирующим органом, которым является TDT-CERT.

**Специальные курсы.** Особую группу проводимых в Институте сварки подготовительных и обучающих курсов составляют курсы специальные, в том числе:

- курс Европейского сварщика искусственных материалов (курс организован по программе EWF — экзамен согласно стандарту PN-EN 13067);
- курс сварщика трубопроводов из искусственных материалов (курс организован по программе IS — экзамен согласно стандарту PN-EN 13067).
- курс для персонала по надзору при изготовлении трубопроводов из искусственных материалов для подачи воды и газа (курс организован по программе IS — экзамен согласно стандарту PN-EN 13067).

В случае сдачи экзамена с положительным результатом, выпускники получают сертификат компетенции CEPW.

Для соединения современных материалов и выполнения ответственных конструкций все чаще используется склеивание. Институт сварки совместно с Институтом Фраунхофера в Бремене организовал курсы склеивания: Европейского техника по склеиванию (EAB) и Европейского специалиста по склеиванию (EAS) в соответствии с рекомендациями Европейской сварочной федерации (EWF 515 и EWF 516). Курсы заканчиваются сдачей письменного и устного экзаменов, а также эк-

замена практического. После окончания курса его участники получают Европейский сертификат. Курс охватывает соединение металлов, стекла, эластомеров, пластомеров и искусственных материалов, армированных волокнами.

Кроме того, в Институте сварки проводится подготовка в области макроскопических и микроскопических металлографических исследований конструкционных материалов и их сварных соединений на трех уровнях:

- Basic Level (BL) — подготовка образцов для макро- и микроскопических металлографических исследований;
- Standard Level (SL) – Инспекционный модуль – оценка качества сварных соединений на основании утвержденных критериев оценки;
- Comprehensive Level (CL).

После сдачи экзамена с позитивным результатом, выпускники получают документ для уровня Basic Level/ Standard Level/Comprehensive Level (Record of Achievement) Европейской сварочной федерации, признаваемый во всех странах Европейского Союза.

**Компьютерная система обслуживания сварочного персонала – KSOP.** Деятельность Института сварки в области подготовки и обучения сварочного персонала требует систематического и очень четкого документирования всех действий, связанных с этой деятельностью, как непосредственно в Институте (в Центре по сварочной подготовке и надзору, а также Центре по сертификации), так и во всех внешних, сотрудничающих с Институтом обучающих центрах. До 2007 г. документирование происходило традиционным путем, т.е. при участии сотрудников Института, заполняющих документы вручную. Когда количество поступающих документов возросло так значительно, что традиционные бюрократические методы не были в состоянии их переработать, а также не было возможности удовлетворить возрастающие требования по качеству обслуживания и срокам выполнения задач, Институт принял решение по использованию современных информационных методов и систем.

Планируя развитие современного Института сварки, уже в 1995 г. в организационной структуре был создан отдел информатики, главной целью которого было создание соответствующей информационной структуры для выполнения задач трех видов: реализации текущих научно-исследовательских работ, проводимых сотрудниками Института (внутренняя компьютерная сеть), обеспечения развивающегося в широком масштабе международного сотрудничества (сеть Интернет) и использования современных компьютерных систем в области управления и работы фирмы (ERP

Enterprise Resource Planning и CRM Customer Relationship Management).

Революционные изменения, происходящие в быстром темпе в мировых информационных технологиях, всегда находили свое отображение в Институте. Первая компьютерная сеть была создана в Институте в 1990 г. на основании уже не существующего стандарта ArcNet. Были введены программы административно-управленческие, охватывающие финансы, кадры и бухгалтерию (сеть FK). Введена в действие сеть, работающая в среде Novell. С течением времени в Институте появлялись новые компьютерные устройства и современные, более сложные компьютерные программы. Старая технология была заменена новой типа Ethernet. В связи с требованиями по безопасности и конфиденциальности данных, сеть FK является автономной. В Институте постепенно изменялась сетевая аппаратура, а также серверы и их операционная система.

В настоящее время, в соответствии с мировыми течениями, в Институте используются решения, целью которых является обеспечение наивысшего уровня безопасности и высокой доступности (HA High Availability) — серверы работают в кластере, управляются программами для виртуализации, а данные накапливаются в redundantных дисковых матрицах. На входе локальной компьютерной сети, соединяющей между собой около 150 устройств, имеющих порт для присоединения к сети Ethernet (серверы, рабочие станции, специализированная исследовательская аппаратура и сварочное оборудование, работающее в сети контроля и наблюдения), установлена наивысшего класса сетевая аппаратура, выполняющая функции Firewall, AntiVirus, Deep Inspection, Web Filtering и AntiSpam. Все активные сетевые устройства являются в полной мере управляемыми, сотрудничают с программным обеспечением наблюдения и работают в стандарте Ethernet 1Gbit/s. Основной костяк сети выполнен при использовании многоволоконного, многомодового световода с помощью агрегирования каналов (Link Aggregation).

Созданием компьютерной инфраструктуры занимаются в Институте сотрудники отдела информатики. Применяемые информационные решения внедрялись без изменений (программы для виртуализации и управления компьютерной сетью) или подвергались доработке с целью удовлетворения специфических аспектов деятельности Института (системы ERP и CRM). Такая доработка имела место в случае информатизации системы подготовки сварочного персонала.

Опыт, накопленный в течение нескольких десятков лет, позволил создать в Польше компьютер-



ную систему обслуживания сварочного персонала (KSOP), охватывающую территорию целой страны. Главной целью KSOP была ее универсальность и устранение необходимости установки какой-либо программы в компьютере потребителя (некоторые учреждения и системы не допускают вмешательства пользователя в существующее программное обеспечение). В системе KSOP была использована интернет-технология, благодаря которой доступ к системе обеспечивает поисковая система в любое время суток и с любой точки Земли.

Компьютерная система обслуживания сварочного персонала KSOP охватывает:

- подготовку, экзаменирование и аттестацию сварщиков в уполномоченных обучающих центрах;

- подготовку, экзаменирование и сертификацию, а также надзор над сертификатом персонала по неразрушающему контролю;

- подготовку, экзаменирование и сертификацию, а также надзор над сертификатом согласно международных требований MIS/EFW для всех реализуемых в настоящее время уровней: IWE, IWT, IWS, IWP, IWIP, IW, EPW и после специальных курсов EFW в уполномоченных Центрах АТВ (в процессе запуска).

Разработку и внедрение компьютерной системы обслуживания сварочного персонала облегчили два информационных проекта, которые были реализованы в отделе информатики института.

Первый — «Система информации и общения в области обучения сварочного персонала и персонала по неразрушающему контролю как элемент роста конкурентоспособности предприятий в области сварочного производства», реализация которого проходила с 2006 по 2008 гг., был дофинансирован со средств Европейского социального фонда в рамках Интегрированной операционной программы регионального развития (ZPORR) — Действие 2.6 «Региональные инновационные стратегии и передача знаний» и Приоритета 2 — «Усиление развития людских ресурсов в регионах».

В рамках этого проекта были созданы базы данных: Директив ЕС, гармонизированных стандартов, рекомендаций и стандартов изделия в части, касающейся обучения и аттестации сварочного персонала и персонала по неразрушающему контролю; учреждений и форм обучения в области подготовки сварочного персонала и персонала по неразрушающему контролю, соответствующих европейским и международным требованиям. Подготовлена также система подготовки и доставки актуальных новостей «Newsletter». В настоящее время в системе зарегистрированы более 400 фирм и около 800 индивидуальных пользовате-

лей, а также существует сайт в Интернете, содержание которого сориентировано на поддержку обучения и подготовки сварочного персонала в широком понимании этого слова. Постоянно обновляемое содержание баз и объем предоставляемых на сайте знаний встречается с постоянной, неослабевающей заинтересованностью. В течение 2007–2015 гг. сайт посетило около 25000 человек.

В рамках второго проекта, POIG.02.03.00-00-003/10 «Информационная сварочная платформа знаний и научно-исследовательского потенциала при одновременном расширении информационной структуры Института сварки», реализация которого происходила с 2011 по 2013 гг., был смонтирован и запущен серверный кластер, основным заданием которого является обеспечение надежности и производительности системы предоставления научной среде созданных в рамках проекта баз данных: исследовательских работ и технологических решений, технологических потребностей предприятий, исследовательского потенциала научных учреждений, конструкционных материалов, усталостных испытаний, вопросов, связанных с инженерией окружающей среды при сварке, и вопросов, касающихся обучения и подготовки сварочного персонала и персонала по неразрушающему контролю.

Процесс интеграции Компьютерной системы обслуживания сварочного персонала с базами знаний для научной среды привел к созданию Информационной сварочной платформы Института сварки (IPS). IPS подвергается постоянному расширению, запускаются очередные новые модули, наилучшим примером является разработанная в 2015 г. консультативная система i-EkoSpawanie, которая будет доступна для пользователей в начале 2016 г. Система i-EkoSpawanie предназначена для технологов по сварке, работодателей, сотрудников отделов по безопасности труда и проектировщиков вентиляционных систем. Эта система позволяет оптимизировать процесс сварки с целью уменьшения до минимума рисков, связанных с выделением сварочных пыли и дыма. Базы данных системы содержат характеристики процессов сварки и сварочных материалов с точки зрения типа и величины выделяющихся вредных веществ.

С самого начала создания IPS предполагалась возможность использования ее также пользователями за пределами Польши. С этой целью в системе использованы многоязычные словари: польско-английско-немецкий и дополнительные какие-либо два.

Благодаря запуску доступа центров обучения к системе KSOP в режиме on-line значительно сократился промежуток времени (даже до одной недели) между составлением экзаменационных протоколов и получением документов с подтверж-

дением квалификаций. Таким образом, было в значительной степени устранено неудобство, связанное с ошибками, которые существенно удлиняли сроки передачи документов заинтересованным лицам. Использующие KSOP центры обучения имеют возможность просмотра всех квалификаций, курсов и курсантов (однако только и исключительно зарегистрированных в данном центре). Система может также помочь при управлении квалификациями, позволяет подготовку различного типа сводок, например, по методам сварки, срокам действия и т.д. Существенным является также факт уменьшения затрат, связанных с регулярной высылкой документов по почте или с помощью курьера, что имеет место в случае центров, не подключенных к системе.

Системой KSOP пользуется более 400 центров подготовки сварщиков, из которых 103 — это пользователи в режиме on-line. Все курсы персонала по неразрушающему контролю заканчиваются выдачей документов благодаря существованию KSOP, которая, кроме того, позволяет также проводить полный надзор над сертификатами. Начиная с 2013 г. системой пользуются 7 высших учебных заведений: в Гданьске, Вроцлаве, Щетине, Ченстохове, Быдгощи, Варшаве и Кракове. В системе зарегистрированы 291 пользователь (по состоянию на конец октября 2015 г.), которые осуществляют обслуживание курсов, аттестации, сертификации и надзора над действием допусков. Система KSOP внедряется постепенно в очередных центрах обучения. К настоящему времени (по состоянию на конец октября 2015 г.) в базе системы KSOP накоплено 380206 документов на квалификации, выданные 204210 курсантам на основании 112625 экзаменационных протоколов. Каждый год база данных пополняется несколькими десятками тысяч записей.

### Выводы

На протяжении последних двадцати пяти лет в Польше сделан огромный шаг вперед в области

подготовки персонала для сварочного производства, удовлетворяющего всем требованиям по количеству и качеству как внутри страны, так и в рамках международного сотрудничества.

Польша (Институт сварки) сотрудничает с EWF с 1992 г.; в 1996 г. Центр по сертификации Института получил статус ANB-EWF, в 1997 г. Институт стал полноправным членом EWF.

Польша (Институт сварки) сотрудничает с IIW с 1958 г. (в области подготовки кадров с 1998 г.) и является полноправным членом IIW; в 1998 г. Центр по сертификации Института получил статус ANB-IIW.

Центр по сварочной подготовке и надзору Института сварки является первым, наибольшим и наиболее активным АТВ в Польше (проводит обучение по программам IWE/EWE, IWT, IWS и IWP).

Кроме АТВ в Институте сварки, в Польше действует 7 АТВ в высших учебных заведениях (проводят обучение по программе IWE/EWE) и 2 АТВ в Центрах обучения (проводят подготовку по программам IWS и IWP), которые получили полномочия от Института сварки.

Во всех АТВ в Польше в период с 1996 по 2014 гг. обучение прошло более 5000 человек сварочного персонала.

В нескольких сотнях обучающих центров, которые находятся под надзором Института сварки, подготовлено десятки тысяч сварщиков, в основном в соответствии с национальными программами (однако документы, которые сварщики получают, признаются за рубежом).

Система гармонизированной, европейской и международной подготовки, аттестации и сертификации персонала по сварочному надзору, а также национальная и международная система подготовки сварщиков — это необходимые условия для реализации международного сотрудничества в области изготовления сварных конструкций и изделий.

1. [www.is.gliwice.pl](http://www.is.gliwice.pl)
2. [www.ewf.be](http://www.ewf.be)
3. [www.iiwelding.org](http://www.iiwelding.org)

Поступила в редакцию 17.12.2015



## 8-я Международная конференция «ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СОЕДИНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ»

2–3 июня 2016

Тимишоара, Румыния

[www.isim.ro](http://www.isim.ro)

УДК 621.81:621.337

# СОВРЕМЕННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КОММУТАЦИОННОЙ И СВАРОЧНОЙ ТЕХНИКИ

## Сообщение 2. Применение методов высокоскоростного испарения в вакууме для изготовления электрических контактов и электродов

**Н.И. ГРЕЧАНЮК<sup>1</sup>, В.Г. ГРЕЧАНЮК<sup>2</sup>, Е.В. ХОМЕНКО<sup>1</sup>, И.Н. ГРЕЧАНЮК<sup>1</sup>, В.Г. ЗАТОВСКИЙ<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Ин-т проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины. 03680, г. Киев, ул. Кржижановского, 3.

E-mail: homhelen@mail.ru

<sup>2</sup>Киевский нац. ун-т строительства и архитектуры. 03037, г. Киев, Водухофлотский просп., 31.

E-mail: knuba@knuba.edu.ua

В статье представлен метод электронно-лучевого испарения–конденсации в вакууме для наиболее перспективных технологий получения современных композиционных материалов, используемых в сварочной и коммутационной технике. В настоящее время этот метод является одним из составляющих технологического процесса получения тонких (до 5 мкм) пленок для радиотехники, микроэлектроники, вычислительной техники и др., а также толстых (более 5 мкм) пленок-конденсатов, широко используемых в качестве эффективных защитных и износостойких покрытий. Изложены результаты научной и производственной деятельности по внедрению в промышленность технологий нанесения на поверхность электрических контактов и электродов толстых пленок на основе меди и тугоплавких металлов (молибдена, вольфрама, хрома) с добавками редкоземельных и других металлов (иттрий, цирконий). По результатам проведенных испытаний на более чем 54 предприятиях Украины, России, Грузии, Румынии, Польши, КНР установлено, что по эксплуатационной надежности разработанные материалы не уступают серебросодержащим порошковым композициям, и в то же время они примерно в 3 раза дешевле последних. Библиогр. 57, табл. 1, рис. 4.

*Ключевые слова:* композиционные материалы, медь и тугоплавкие металлы, сварочная и коммутационная техника, электронно-лучевое испарение, пленки конденсатов, эксплуатационная надежность

Разработка физико-химических основ создания новых материалов — объективная необходимость технического и социального развития общества. Без этого невозможно достичь существенного прогресса ни в одном из важных направлений науки и техники. Исходя из оценки американских экспертов, в ближайшие 20 лет 90 % современных материалов будет заменено принципиально новыми, что приведет к технической революции практически во всех областях промышленности [1, 2]. Одним из прогрессивных направлений создания принципиально новых материалов с наперед заданными свойствами есть высокоскоростное электронно-лучевое испарение — конденсация металлических и неметаллических материалов в вакууме. Испарение и последующая конденсация материалов в вакууме — относительно новое направление в материаловедении [3].

В настоящее время ни одна область техники, связанная с получением и обработкой материалов, не обходится без электронно-лучевого направления. Это объясняется наиболее высокой эффективностью электронного луча по сравнению с другими известными концентрированными потоками энергии (лазером, плазмой). Электронный луч имеет наибольший коэффициент поглощения

энергии. Диапазоны мощности и концентрации энергии в луче значительны (мощность электронных лучей — 1 МВт и более). В этой связи нагрев материала до заданных температур плавления и испарения происходит с очень высокими скоростями [4].

Электронно-лучевое испарение–конденсация в вакууме является одним из составляющих технологического процесса получения тонких (до 5 мкм) пленок для радиотехники, микроэлектроники, вычислительной техники и др. [5], а также толстых (более 5 мкм), используемых в качестве эффективных защитных и износостойких покрытий [6–10].

Перспективным является создание многокомпонентных покрытий, предназначенных для повышения эрозионной стойкости электрических контактов коммутационных аппаратов. Научный и производственный опыт, приобретаемый при разработке покрытий из сплавов на основе меди, легированных оловом, хромом, алюминием, никелем, титаном обобщен в монографии [11].

О возможности применения высокопрочных пленок системы Cu–0,5 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (тут и далее мас. %) в качестве покрытий изделий электротехнического назначения отмечается в работе [12].



Установлено, что осажденные в вакууме покрытия значительно превосходят соответствующие гальванические по уровню износостойкости и, особенно, температурной стабильности.

Несмотря на очевидные преимущества, вакуумные покрытия не всегда экономически оправданы, поскольку коэффициент использования пара обычно не превышает 10...15 %. В то же время из-за разности упругости паров компонентов возникают непреодолимые трудности при испарении из одного источника материалов на основе меди или серебра с добавками тугоплавких металлов: вольфрама, молибдена, тантала, ниобия, циркония в том или ином соотношении, соответствующем составу современных электроконтактных материалов.

Как известно, традиционными методами получения композиционных материалов (КМ) для электрических контактов являются методы порошковой металлургии. Технологические особенности получения материалов для электрических контактов, их эксплуатационные характеристики и области применения приведены в публикациях [13–20]. Последние достижения в этой области материаловедения обобщены в работе [21].

Несмотря на широкий выбор материалов для коммутационной и сварочной техники проблема создания высоконадежных КМ так до конца и не решена, поскольку требования, предъявляемые к материалу контактов, зависят от типа коммутационного аппарата и изменяются по мере его совершенствования и замены новым. Аналогичные требования существуют и для КМ, используемых в сварочной технике. Удовлетворить эти требования могут материалы, характеризующиеся оптимизированной структурой и соответствующим комплексом свойств, обеспечивающие формирование в рабочем слое «вторичной структуры» с повышенными электроэрозионной стойкостью, сроком службы и надежностью.

Определяющее влияние на эксплуатационные характеристики материалов электрических контактов и электродов оказывает структурный фактор. Повышение дисперсности КМ в системе Ag–Me, Ag–MeO способствует снижению интенсивности плазменных потоков, увеличению электроэрозионной стойкости контактов и электродов из этих материалов [22].

Процессы испарения и конденсации позволяют конструировать материалы на атомно-молекулярном уровне и, как результат, прецизионно регулировать их дисперсность. В этой связи значительный научный и практический интерес представляет использование высокоскоростного электронно-лучевого испарения и последующей конденсации металлов в вакууме для получения

массивных конденсированных КМ для электрических контактов и электродов. Конденсированные из паровой фазы КМ на основе чистых металлов и их сплавов, оксидов, карбидов, боридов, КМ дисперсно-упрочненного, микрослойного и микропористого типов толщиной 0,1...2,0 мм с 1970-х годов исследуются в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины [23], Королевском авиационном научно-исследовательском институте Министерства обороны Великобритании [24], ряде других научно-исследовательских лабораторий [25]. Результаты этих исследований обобщены в работах [26, 27]. Однако о промышленном выпуске подобных материалов как отдельных конструктивных элементов узлов, приборов и механизмов до последнего времени ничего не было известно.

Наибольший интерес представляет разработка и широкое внедрение в различные отрасли техники конденсированных из паровой фазы КМ для контактов и электродов, не содержащих благородных металлов. Следует отметить, что материалы, полученные методами порошковой металлургии без благородных металлов, широко распространены в производстве электродов и контактов коммутационных аппаратов. Порошковые КМ для этих контактов и электродов содержат 20...80 % тугоплавкой составляющей (как правило, это вольфрам, молибден и хром), а легкоплавкой является медь. Технологическими добавками могут быть никель, кобальт, функциональными — некоторые оксиды, бор и другие элементы и соединения. В промышленности в основном применяют порошковые КМ с содержанием 50 и 70 % тугоплавкой фазы [15, 28].

При использовании контактов и электродов из КМ системы W–Cu продуктами окисления чаще всего являются оксиды  $WO_3$  и  $Cu_2O$  [16, 29]. Их удельное электросопротивление изменяется в довольно широких пределах: для  $WO_3$  от 1 (при сильном отклонении) до  $1 \cdot 10^{12}$  Ом/см (при стехиометрическом составе), для  $Cu_2O$  — от  $10^3$  до  $10^{10}$  Ом/см.

При коммутации тока на воздухе подобные процессы наблюдаются и в рабочем слое контактов из псевдосплавов Mo–Cu. Молибден и медь взаимно ограниченно растворимы [30], в то время как их оксиды взаимодействуют и образуют стойкие соединения ( $CuMoO_4$ ,  $Cu_3Mo_2O_9$ ) [31, 32]. При температуре выше 700 °C возникает легкоплавкая эвтектика в системе  $MoO_3$ – $Cu_2O$ . Установлено, что оксидная пленка, имеющая состав эвтектики этой системы, легко растекается по поверхности контакта, заполняя неровности [31, 32]. Пленка имеет слабую адгезию к основе и ее отслаивание после кристаллизации от поверхности контакта способствует эффекту «самозачистки»

и снижению уровня переходного сопротивления контактной пары [28].

При решении проблемы получения из паровой фазы композитов для электрических контактов и электродов был выполнен ряд научных и прикладных исследований по разработке КМ на основе меди, молибдена, вольфрама и хрома, которые включали:

- выбор легирующих элементов и разработку процессов их введения в медную матрицу для получения двух- и многокомпонентных КМ на основе меди с повышенными физико-химическими, механическими и коррозионными характеристиками;

- исследование влияния межфазного взаимодействия в системе медь–тугоплавкая составляющая, материала, температуры и шероховатости подложки на структуру и свойства КМ;

- анализ изменения структуры и свойств КМ в зависимости от химического состава исходных (испаряемых) компонентов и скорости их осаждения; обоснование выбора материала разделительного шара;

- изучение влияния легирующих фаз на повышение скорости испарения меди и определение оптимального состава легирующих добавок;

- проведение комплексных исследований структуры, физико-химических и механических свойств градиентных двух- и многокомпонентных КМ на основе меди, полученных на стационарной и вращающейся подложках;

- проведение комплексных коррозионных исследований КМ и определение механизмов протекания коррозионных процессов;

- выдачу рекомендаций коррозионностойких конденсированных с паровой фазы КМ на основе меди, создание промышленного оборудования и технологий их производств.

Основные результаты проведенных фундаментальных, научных и прикладных исследований изложены в работах [33–35] и обобщены в [36]. Итоги выполнения указанных выше работ можно обозначить следующим образом. Сформулированы физико-химические принципы конструирования конденсированных из паровой фазы КМ на основе меди, которые позволили осуще-

ствить переход от лабораторных исследований к их широкому промышленному применению. Проведены комплексные исследования структуры, физико-химических, механических и эксплуатационных свойств КМ Cu–Mo, Cu–W, Cu–Cr, (CuZrY)–Mo в интервале концентраций тугоплавких компонентов до 50 %; проведены комплексные исследования коррозионной стойкости двух- и многокомпонентных КМ и рассчитаны баллы их коррозионной стойкости; установлено образование пересыщенных твердых растворов в КМ Cu–W, Cu–Mo, Cu–Cr на субмикронном уровне, что приводит в результате их распада к формированию слоистой структуры. Впервые предложено легировать медную матрицу цирконием и иттрием с общим их содержанием в КМ до 0,1 % путем испарения меди через ванну-посредник из сплава Cu–Zr–Y, что обеспечило одновременное повышение коррозионной стойкости КМ и скорости испарения меди в 2...3 раза и экспериментально показано, что конденсированные из паровой фазы КМ Cu–0,1(Zr,Y)–(8...12)Mo и КМ Cu–0,1(Zr,Y)–(0,3...0,34)Cr–(8...12)Mo представляют собой объемные нанокристаллические системы.

**Конденсированные из паровой фазы КМ Cu–Zn–Y–Mo.** Наибольшее промышленное применение нашли системы Cu–Zn–Y–Mo [33, 36, 37].

Химический состав и основные физико-механические свойства указанных материалов приведены в табл. 1.

Новые композиты, получившие название материалы дисперсно-упрочненные для электрических контактов (МДК) сертифицированы в соответствии с украинскими стандартами [38, 39]. Химический состав и технология их изготовления защищены патентами Украины и Российской Федерации [40–42].

Конденсированные из паровой фазы КМ на основе меди, молибдена и вольфрама характеризуются слоистой структурой с иерархией слоев на макро-, микро- и субмикронном уровне (рис. 1).

При небольшой концентрации молибдена (до 7...8 %), вольфрама (до 4 %) слоистость слабо выражена. С повышением содержания тугоплавкого составляющего контраст изображения уве-

Таблица 1. Химический состав и физико-механические свойства КМ Cu–Zr–Y–Mo

Материал	Химический состав материала, мас. %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Удельное электросопротивление, мкОм·м	Твердость HV, МПа	Механические свойства			
					до отжига		после отжига в вакууме 900 °С, 1 ч	
					σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %	σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %
МДК-1	Cu–(0,05...0,1)(Zr,Y)–(3...5)Mo	8,9...9,0	0,021...0,022	1000...1500	300...430	10,3...7,3	295...420	17,6...9,3
МДК-2	Cu–(0,05...0,1)(Zr,Y)–(5,1...8)Mo	9,0...9,05	0,022...0,024	1500...1650	440...630	7,25...3,4	425...600	9,45...4,9
МДК-3	(Cu–0,05...0,1ZrY)–(8,1...12)Mo	9,05...9,1	0,024...0,028	1650...1800	635...785	3,25...1,8	605...730	4,85...3,9

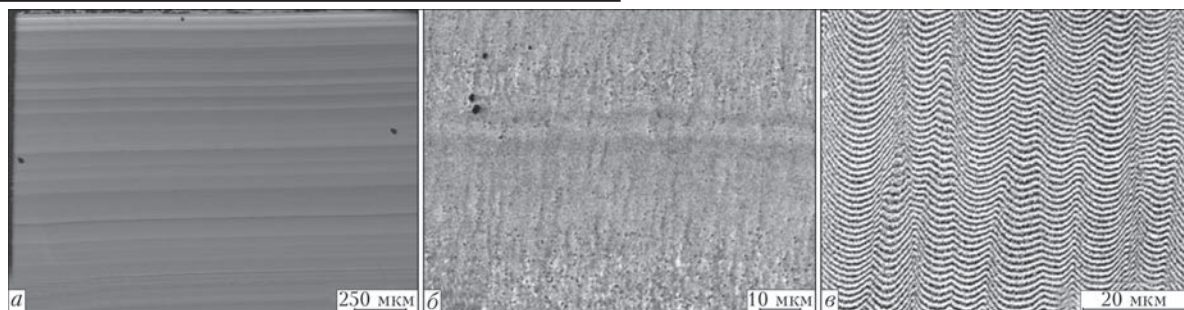


Рис. 1. Слоистая структура КМ на основе меди и молибдена на макро- (а), микро- (б) и субмикронном уровне (в)

личивается, что указывает на усиление слоистости, что обусловлено различными факторами. Наличие слоистости на макроуровне вероятней всего обусловлено возникновением электрических микропробоев, возникающих при высокоскоростном испарении исходных технически чистых компонентов (скорость осаждения меди на вращающуюся стальную подложку диаметром 1000 мм достигает 60...70 мкм/мин, молибдена – 6...8 мкм/мин). Слоистость на микроуровне вызвана примесями, присутствующими в исходных (испаряемых) материалах. Возникновение слоев на субмикронном уровне связано с образованием пересыщенных твердых растворов, которые, распадаясь, формируют соответствующие микрослои [36]. Коммутационные испытания показали, что в таком градиентном слоистом наноматериале изменения химического состава слоев существенно ограничивают зону термического влияния разряда. В ряде типов коммутационных аппаратов и приборов наблюдаются меньшие изменения рабочего слоя контактов и электродов и повышение эрозионной стойкости по сравнению с аналогами, полученными методами порошковой металлургии.

Наиболее эффективные области применения МДК – городской транспорт (контакты, используемые в городских трамваях, троллейбусах, поездах метро; междугородный электротранспорт, тепловозы, электропоезда; лифтовое хозяйство (пассажирские и грузовые лифты); портовые, корабельные краны и другие подъемно-транспортные механизмы; электрокары всех типов; гор-

но-шахтное оборудование: промышленные и бытовые электротехнические устройства, содержащие реле, пускатели, контакторы, рубильники и т.п.

Общий вид разрывных контактов, изготовленных с применением материалов МДК, представлен на рис. 2.

Композиционные материалы МДК-3 нашли промышленное применение в качестве электродов для сварки латунной ленты с медной проволокой на конденсаторных точечных машинах типа ТКМ 15 и ТКМ 17. Ниже приведены результаты испытаний электродов на предприятии «Шосткинский казенный завод «Импульс».

Фактический ресурс работы электродов, изготовленных из материала МДК-3 (плановый ресурс работы 100000 циклов):

- № 1 (верхний электрод на ТКМ 15) — 105000;
- № 2 (нижний электрод на ТКМ 15) — 120000;
- № 3 (верхний электрод на ТКМ 17) — 110000;
- № 4 (нижний электрод на ТКМ 15) — 125000.

Электроды, изготовленные из композиционного материала МДК-3, соответствуют всем требованиям, предъявляемым к электродам, используемым на конденсаторных точечных машинах типа ТКМ 15 и ТКМ 17.

Принципиально новым применением материалов МДК-3 стало их использование в качестве электродов для сварки живых тканей [43]. Из указанных материалов освоено производство мундштуков для сверхзвукового электродугового напыления. Перспективным является замена материалами МДК бериллиевой бронзы. В отличие от бронзы КМ марки МДК не теряют прочности вплоть до температуры нагрева до 900 °С. Указанные КМ также могут быть использованы как пружинные сплавы с высокой электропроводностью, сплавы, стойкие к радиационному распуханию, и как покрытия на зеркалах силовой металлооптики [36].

**Конденсированные из паровой фазы КМ Cu–Cr–Zr–Y–Mo.** Композиционные материалы Cu–(0,2...0,41)Cr–(0,05...0,1)(Zr,Y)–(8...12)Mo (марка МДК3Х) являются оптимизированным вариантом МДК3. Экспериментально подтверждено, что КМ Cu–(0,05...0,1)(Zr,Y)–(8...12)Mo представляют собой объемные нанокристаллические мате-

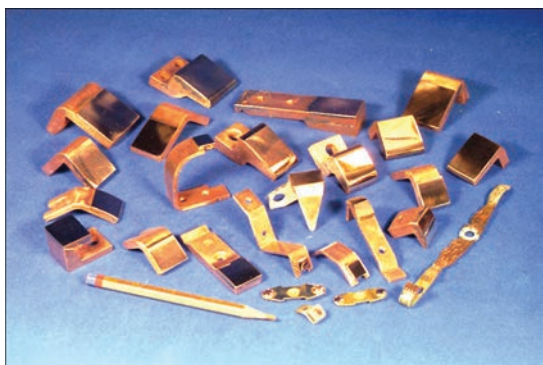


Рис. 2. Общий вид типичных разрывных контактов, изготовленных с применением материалов МДК



риалы со средними размерами зерна: меди 80 нм, молибдена 10 нм. Благодаря дополнительному легированию хромом МДКЗХ отличаются в 1,5...2,0 раза более высокой коррозионной стойкостью по сравнению с МДКЗ при сохранении уровня физико-механических свойств последних [44]. Они в основном используются для изготовления разрывных контактов горно-шахтного оборудования, где влажность достигает более 80 % и присутствуют агрессивные газы  $\text{CO}_2$  и  $\text{SO}_2$ , в частности, на Смолинской и Ингульской шахтах по добыче урана.

**Конденсированные из паровой фазы КМ Cu–Zr–Y–C.** Композиционные материалы Cu–(0,05...0,1)(Zr,Y)–(0,3...0,6)C (марка МДКЗС) используются в промышленном масштабе для изготовления скользящих контактов [45, 46]. Пантографы из данных материалов (рис. 3) нашли применение в локомотивах, обеспечивающих движение вагонеток с медной рудой на медно-рудном комбинате (Люблин, Польша).

**Конденсированные из паровой фазы КМ Cu–(0,05...0,1)(Zr,Y)–W.** Структура, физико-химические, механические и эксплуатационные свойства композитов с содержанием вольфрама до 50 % подробно описаны в работах [47–50]. Композиционные материалы на основе меди и вольфрама традиционно используются в качестве сильноточных электрических контактов масляных выключателей. В последнее время они также находят применение в некоторых типах вакуумных приборов. В частности, конденсированные из паровой фазы КМ Cu–(0,05...0,1)(Zr,Y)–(32...36)W нашли промышленное применение для изготовления контактов масляных выключателей типа РНО и РНТ-17. Указанные материалы прошли успешную опытно-промышленную апробацию в вакуумных дугогасительных камерах МВК-440, которые, в основном, используются в угольных шахтах [51].

**Конденсированные из паровой фазы КМ Cu–(0,05...0,1)(Zr,Y)–Cr.** Влияние технологических факторов на структуру и механические свойства конденсированных из паровой фазы КМ Cu–

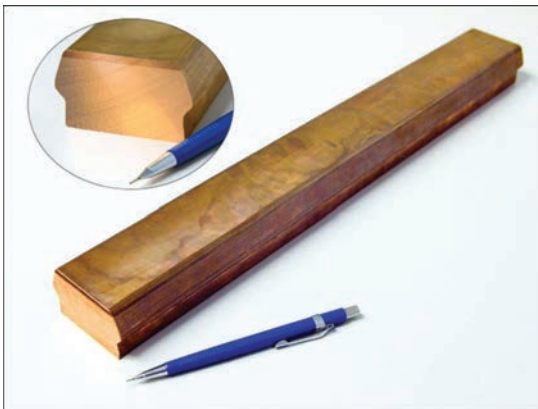


Рис. 3. Общий вид скользящих контактов, изготовленных из материала МДКЗС

Zr–Y–Cr с содержанием хрома до 60 % описано в работе [52]. КМ Cu–Cr с содержанием 35...50 % хрома широко используют для изготовления контактов вакуумных дугогасительных камер.

Возможность использования конденсированных КМ этой системы обусловлена особенностями химического состава и морфологии «вторичной» структуры, образующейся на рабочей поверхности контактов. В неравновесных условиях дугового разряда в рабочем слое увеличивается взаимная растворимость меди и хрома и происходит распад твердых растворов с формированием дисперсной структуры. Конденсаты Cu–Zr–Y–Cr при этом содержании хрома имеют слоистую структуру на макро-, микро- и субмикроуровнях. Слоистость последних двух уровней обусловлена анизотропией нормального роста зерен, способствующей формированию «столбчатости» в пределах нескольких слоев конденсата, в которых под воздействием температуры и времени в сечении слоя, перпендикулярном столбцам, образуется структура с полигональной формой зерен (рис. 4, а) и признаками расслоения твердого раствора (рис. 4, б).

Изменение твердости (по Виккерсу) в зависимости от содержания хрома имеет линейный характер, в интервале концентраций 35...50 % Cr твердость изменяется в пределах 2069...2503 МПа. При испытании на растяжение предел прочности увеличивается до 550 МПа, однако КМ при этом

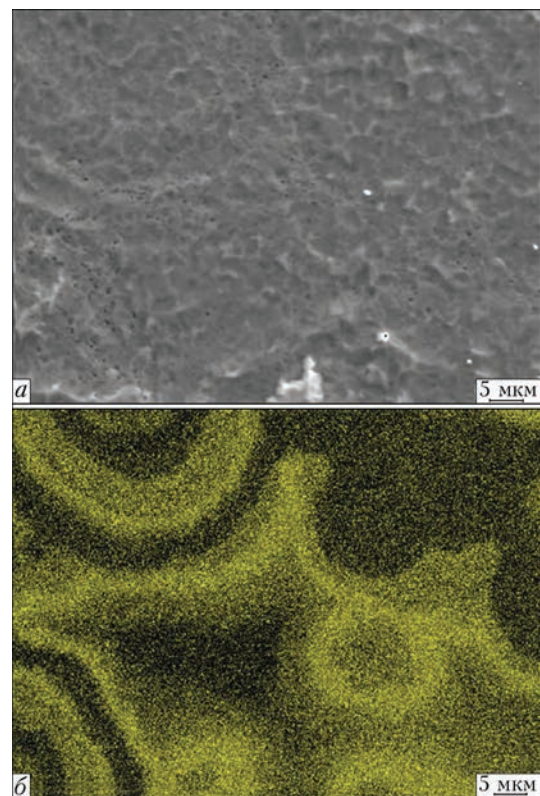


Рис. 4. Микроструктура КМ Cu–Zr–Y–Cr с содержанием хрома 35...50 %: во вторичных электронах (а) и в рентгеновских лучах меди (б)

имеет нулевую пластичность. КМ Cu–Zr–Y–Cr находят применение для изготовления контактов дугогасительных камер [53, 54].

Конденсированные из паровой фазы КМ отличаются рядом достоинств: их получают за один технологический цикл, они дешевле аналогов, получаемых методами порошковой металлургии (в 1,5...1,7 раза) и существенно (в 4 раза) дешевле материалов серебросодержащих контактов. По эксплуатационной надежности конденсированные КМ не уступают материалам на основе серебросодержащих композиций. Они хорошо обрабатываются резанием, шлифованием, сверлением, легко паяются любыми из известных способов пайки с использованием стандартных серебросодержащих и бессеребряных припоев. Создано промышленное сертифицированное электронно-лучевое оборудование для производства КМ, конденсированных из паровой фазы [55, 56], которое позволяет изготавливать до 12 т в год композитов различного химического состава. За период с 1995 по 2015 гг. получено более 15 т КМ, из которых произведено около 1,6 млн контактов и электродов 386 типоразмеров [57].

### Выводы

Создано промышленное электронно-лучевое оборудование для производства конденсированных из паровой фазы КМ на основе меди, молибдена, вольфрама и хрома, используемых при изготовлении электрических контактов и электродов.

Проведенные более чем на 54 предприятиях Украины, России, Грузии, Румынии, Польши, КНР испытания показали, что по эксплуатационной надежности разработанные материалы не уступают серебросодержащим порошковым композициям и в то же время они примерно в 3 раза дешевле последних.

1. *Новые материал* / Под ред. Ю.С. Коробасова. – М.: МИСИС, 2002. – 736 с.
2. *Материаловедение*. Технологии конструкционных материалов / Под ред. В.С. Чередниченко. – М.: Омега-Л, 2008. – 751 с.
3. *Bunshah R.F.* Vacuum evaporation – history. Recent developments and application // *Zeitschrift für Metallkunde*. – 1984. – 75, № 11. – Р. 840–846.
4. *Зуев И.В.* Обработка материалов концентрированными потоками энергии. – М.: МЭИ, 1998. – 162 с.
5. *Технология тонких пленок*. Справочник / Под ред. Л. Майсела и З. Гленга. – М.: Сов. радио, 1997. – Т.И. – 662 с. – Т.2 – 764 с.
6. *Самсонов Г.В., Эпик А.П.* Тугоплавкие покрытия. – М.: Металлургия, 1973. – 398 с.
7. *Шиллер З., Гайзиг Г., Панцер З.* Электронно-лучевая технология. – М.: Энергия, 1980. – 528 с.
8. *Мовчан Б.А., Малошенко И.С.* Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. – Киев: Наук. думка, 1983. – 230 с.
9. *Повышение качества поверхности и плакирование металлов*. Справочник / Под ред. А. Кнаунирс. – М.: Металлургия, 1984. – 376 с.

10. *Елисеев Ю.С., Абрамов Н.В., Кримов В.В.* Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиастроении. – М.: Высш. шк., 1999. – 522 с.
11. *Косторжизкий А.И., Лебединский О.В.* Многокомпонентные вакуумные покрытия. – М.: Машиностроение, 1987. – 207 с.
12. *Ильинский А.И.* Структура и прочность слоистых и дисперсно-упрочненных пленок. – М.: Металлургия, 1986. – 140 с.
13. *Францевич И.Н.* Электрические контакты, получаемые методом порошковой металлургии // *Порошковая металлургия*. – 1980. – № 8. – С. 36–47.
14. *Раховский В.И., Левченко Г.В., Теодорович О.К.* Разрывные контакты электрических аппаратов. – М.: Металлургия, 1966. – 295 с.
15. *Спеченные материалы для электротехники и электроники*. Справочник / Под ред. Г.Г. Гнесина. – М.: Металлургия, 1981. – 343 с.
16. *Материалы в приборостроении и автоматике*. Справочник / Под ред. Ю.М. Пятин. – М.: Машиностроение, 1982. – 527 с.
17. *Композиционные материалы*. Справочник / Под ред. Д.М. Карпиноса. – Киев: Наук. думка, 1985. – 591 с.
18. *Тучинский Л.И.* Композиционные материалы, получаемые методом пропитки. – М.: Металлургия, 1998. – 206 с.
19. *Композиционные материалы для контактов и электродов* / Р.В. Минакова, М.Л. Грекова А.П., Кресанова, Л.А. Крячко // *Порошковая металлургия*. – 1995. – № 7/8. – С. 32–52.
20. *Slade Paul G.* The Vacuum Interrupter. Theory, Design and Application. – CRC Press, 2008. – 528 p.
21. *Хоменко Е.В., Гречанюк Н.И., Затовский В.Г.* Современные композиционные материалы для коммутационной и сварочной техники. Сообщение 1. Порошковые композиционные материалы // *Автомат. сварка*. – 2014. – № 10. – С. 38–44.
22. *Leis P., Schuster K.K.* Der einfluss des kontaktmaterials auf die ausbildung von plasmastrahlen // *Electric*. – 1979. – 33, № 10. – S. 541–516, 559.
23. *Мовчан Б.А., Гречанюк Н.И.* Новые материалы и покрытия, получаемые по электронно-лучевым технологиям // Сб. тр. ЭЛТ-88 (31 мая–4 июня 1988 г., Варна, Болгария). – Варна, 1988. – С. 1005–1023.
24. *Фаткуллин О.Х.* Новые конструкционные порошковые материалы и их применение // *Итоги науки и техники*. Порошковая металлургия. – М.: ВИНТИ, 1991. – Т. 5. – С. 140–177.
25. *Singh I., Wolfe D.E.* Review Nano and macro-structured component fabrication by electron (EB-PVD) // *J. of Materials Science*. – 2005. – 40. – Р. 1–26.
26. *Демчишин А.В.* Структура и свойства толстых вакуумных конденсатов металлических и неметаллических материалов и научные основы их получения: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР, 1981. – 35 с.
27. *Гречанюк Н.И.* Новые конструкционные материалы, полученные путем конденсации паровой фазы в вакууме для изделий новой техники: Дис. ... д-ра техн. наук. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР, 1988. – 520 с.
28. *Минакова Р.В., Кресанова А.П., Гречанюк Н.И.* Композиционные материалы для контактов и электродов. Материалы на основе молибдена // *Электрические контакты и электроды*. – Киев: Ин-т проблем материаловедения НАН Украины, 1996. – С. 95–105.
29. *Slade P.E.* Arc erosion of tungsten based contact materials. A review // *Int. J. of Refractory and Hard Metals*. – 1986. – 5, № 4. – Р. 208–214.
30. *Двойные и многокомпонентные системы на основе меди* / Под ред. М.Е. Дриц, Н.П. Бочвар, Л.С. Гузей и др. – М.: Наука, 1979. – 248 с.
31. *Mackey T., Ziolkowski I.* Sybsoilas phase diagram of Cu<sub>2</sub>O–CuO–MoO system // *J. Solid Stat. Chem*. – 1980. – № 31. – Р. 135–143.
32. *Mackey T., Ziolkowski I.* Phase relation in the cupric molibdates – cuprous molibdates system // *Ibid* – Р. 145–151.

33. *Гречанюк И.Н.* Структура, свойства и электронно-лучевая технология получения композиционных материалов Cu–Zr–Y–Mo для электрических контактов: Дис. ... канд. техн. наук. – Киев: ИПМ им. И.Н. Францевича НАН Украины, 2007. – С. 171.
34. *Чорновол В.О.* Структура і корозійна стійкість композиційних матеріалів Cu–Mo, Cu–W, отриманих методом електронно-променевого випаровування-конденсації: Автореф. дис. .... канд. техн. наук. – Киев: ИПМ им. И.Н. Францевича НАН Украины, 2011. – 22 с.
35. *Артюх А.Ю.* Розробка матеріалів для електричних контактів на основі міді й молибдену, легованих Al, Cr, Zn, отриманих методом електронно-променевого випаровування – конденсації: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев: ИПМ им. И.Н. Францевича НАН Украины, 2011. – С. 20.
36. *Гречанюк В.Г.* Фізико-хімічні основи формування конденсованих з парової фази композиційних матеріалів на основі міді: Автореф. дис. .... канд. техн. наук. – Киев: ИПМ им. И.Н. Францевича НАН Украины, 2013. – С. 40.
37. *Композиционные материалы на основе меди и молибдена для электрических контактов, конденсированные из паровой фазы. Структура, свойства, технология. Ч. 2. Основы электронно-лучевой технологии получения материалов для электрических контактов / Н.И. Гречанюк, В.А. Осокин, И.Н. Гречанюк и др. // Современ. электротехнология. – 2006. – № 2. – С. 9–19.*
38. *ТУУ 20113410.001–98.* Материали дисперсно-упрочнені для електричних контактів. – Введ. 02.06.98.
39. *ТУ У24.4-33966101-001:2014.* Матеріали дисперсно-зміцнені для електричних контактів. – Введ. 17.11.14.
40. *Пат. 34875 Україна.* Композиційний матеріал для електричних контактів та спосіб його отримання / М.І. Гречанюк, В.О. Осокін, І.Б. Афанасьєв, І.М. Гречанюк. – Опубл. 16.12.2002 р.
41. *Пат. 74155 Україна.* Спосіб отримання мікрошаруватих термостабільних матеріалів / М.І. Гречанюк. – Опубл. 15.11.2005 р.
42. *Пат. № 2271404 РФ.* Способ получения микрослойных термостабильных материалов / Н.И. Гречанюк. – Опубл. 03.10.2006 г.
43. [www.weldinglivetissues.com](http://www.weldinglivetissues.com)
44. *Пат. 104673 Україна.* Композиційний матеріал для електричних контактів та спосіб його отримання / М.І. Гречанюк, В.Г. Гречанюк, В.В. Бухановський. – Опубл. 25.02.2014 р.
45. *Performance of sliding contacts with Cu–Mo layers for transportation in mining industry / B. Miedzinski, Z. Okraszewski, N. Grechanyuk, S. Wandzio // Электрические контакты и электроды. – Киев: Ин-т проблем материаловедения НАН Украины, 2008. – С. 150–155.*
46. *Manufacturing Technique and Properties of Condensed Copper-Carbon Composite Materials for Sliding Electrical Contacts / N. Grechanyuk, R. Minakova, V. Bukhanovsky, N. Rudnitsky // Open Access Library J. – 2014. Vol.1. – P. 1–9.*
47. *Пат. 86434 Україна.* Композиційний матеріал для електричних контактів і електродів та спосіб його отримання / М.І. Гречанюк, І.М. Гречанюк, В.Г. Гречанюк. – Опубл. 27.04.2009 р.
48. *Взаємозв'язок між складом, структурою і механічними властивостями конденсованого композиційного матеріалу системи мідь-вольфрам / В.В. Бухановський, М.П. Рудницький, В.В. Харченко та ін. // Проблемы прочности. – 2011. – № 4. – С. 87–102.*
49. *Production technology, structure and properties of Cu–W layered composite condensed materials for electrical contacts / V.V. Bukhanovskyi, N.I. Grechanyuk, R.V. Minakova et. al. // Refractory Metals and Hard Materials. – 2001. – 29, Is. 5. – P. 573–581.*
50. *Структура і фізико-хімічні властивості композиційних матеріалів на основі міді і вольфраму, отриманих методом електронно-променевого випаровування / В.О. Денисенко, Р.В. Мінакова, В.Г. Гречанюк, І.М. Гречанюк // Наук. вісн. Чернівецького ун-ту. Хімія. – 2008. – Вип. № 422. – С. 26–33.*
51. *Performance of LV vacuum contactors with condensed composite multicomponent contacts / B. Miedzinski, Z. Okraszewski, M. Grechanyuk et. al. // Электрические контакты и электроды. – Киев: Ин-т проблем материаловедения НАН Украины, 2010. – С. 139–144.*
52. *Влияние технологических факторов на структуру, механические свойства и характер разрушения композиционного материала системы медь-хром / В.В. Бухановский, Н.И. Гречанюк, Н.П. Рудницкий и др. // Металловед. и терм. обработка металлов. – 2009. – № 8. – С. 26–31.*
53. *Пат. 32368А. Україна.* Контактный материал для дугогасительных камер и способ его получения // М.І. Гречанюк, М.М. Плащенко, В.О. Осокін та ін. – Опубл. 15.12.2000 р.
54. *Пат. 76737 Україна.* Контактна система вакуумної дугогасної камери / М.І. Гречанюк, М.М. Плащенко, А.В. Зварич, В.О. Осокін. – Опубл. 15.09.2006 р.
55. *Гречанюк В.Г.* Корозійностійкі композиційні матеріали на основі міді й електронно-променевого обладнання для їх створення // Наук. вісн. Чернівецького ун-ту. – 2013. – № 640. – С. 43–51.
56. *ДСТУ ГОСТ 15.005:2009.* Создание изделий единичного и мелкосерийного производств, собираемых на месте эксплуатации. – Введ. 02.01.09.
57. *ТУ У 31.20113410-003–2002.* Контакти електричні на основі дисперсно-зміцнених матеріалів (МДК). – Введ. 30.10.02.

Поступила в редакцию 21.07.2015

## МЕТАЛЛ. ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТ-2016 VI специализированная выставка

23–25 марта 2016

г. Львов, Дворец спорта «Украина»

На выставке будут представлены современные технологии, способствующие переоснащению машиностроительной промышленности Украины.

Участники выставки «Металл. Оборудование. Инструмент-2016» смогут расширить торгово-экономические связи и наладить важные партнерские отношения.

Выставка имеет цель ознакомить с современным оборудованием для производства и обработки металла, в частности, оборудованием для восстановления и защиты металлических поверхностей; технологиями соединения, защиты и другими технологиями машиностроения.



## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ШЛАКОВОЙ КОРКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ АГЛОМЕРИРОВАННЫХ ФЛЮСОВ

И.А. ГОНЧАРОВ<sup>1</sup>, Л.И. ФАЙНБЕРГ<sup>1</sup>, А.А. РЫБАКОВ<sup>1</sup>, А.В. НЕТЯГА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, г. Киев, просп. Победы, 37

Использование отходов плавящихся и агломерированных флюсов является актуальной задачей. Но применительно к агломерированным флюсам отсутствуют литературные данные об эффективном использовании шлаковой корки. В данной работе проведен анализ возможности использования шлаковой корки агломерированных флюсов для изготовления флюсов, обеспечивающих качественное формирование и высокие механические свойства металла шва при скоростной многодуговой сварке хладостойких низколегированных сталей. Проведено сравнительное исследование сварочно-технологических свойств оригинального флюса ОК 10.74 и опытных флюсов на основе дробленой шлаковой корки при одно- и четырехдуговой сварке. Методом спектрального анализа изучен химический состав металла сварных швов. Методом оптической металлографии исследованы распределение в них неметаллических включений и особенности микроструктуры. Ударную вязкость металла швов определяли методом испытаний на ударный изгиб. Установлено, что флюс, изготовленный по методу агломерирования с добавкой в состав шихты 5 мас. % марганца металлического, по всем исследованным показателям близок к оригинальному флюсу ОК 10.74, а по уровню ударной вязкости отвечает требованиям к сварным соединениям хладостойких газопроводных труб из сталей категории прочности до Х80 включительно. Полученные результаты представляют интерес для потребителей флюса с точки зрения повышения эффективности его использования при многодуговой сварке труб большого диаметра. Библиогр. 10, табл. 4, рис. 3.

*Ключевые слова:* сварка под флюсом, агломерирование, регенерирование, неметаллические включения, микроструктура, ударная вязкость металла шва

При сварке под флюсом образуются отходы, включающие нерасплавленную часть флюса и шлаковую корку (ШК), которая характеризуется пониженным содержанием водорода, растворенного в форме  $\text{OH}^-$  [1], серы и фосфора. Эти отходы, относящиеся к III классу опасности, должны храниться в закрытой таре. Объемы ШК на ряде предприятий, например, трубных заводах, исчисляются тысячами тонн, поэтому работы по их утилизации весьма актуальны. Вопрос использования отходов плавящихся флюсов (нерасплавленной части флюса и ШК) стоит перед исследователями уже достаточно давно [2]. Известна технология регенерации нерасплавленной части флюса [3], которая на передовых трубных станах реализуется непосредственно в процессе сварки. ШК используют при выплавке флюсов [4], либо путем ее добавления в измельченном виде к исходному флюсу. Исследования показали, что в процессе сварки не происходит существенных изменений в строении и составе шлака, исключающих возможность его применения непосредственно в виде флюса [5]. Поэтому ее использование в качестве компонента шихты для выплавки флюса нерационально в случаях, когда нет необходимости получать флюсы с насыпной массой  $< 1,1 \text{ кг/дм}^3$ , используемые обычно при многодуговой сварке с повышенной скоростью. Предложена технология изготовления

регенерированных сварочных флюсов, заключающаяся в дроблении ШК с последующей магнитной сепарацией и рассевом на фракции [6]. Такие флюсы обеспечивают повышенную стойкость сварных швов к порообразованию [7].

Все описанные выше исследования касались сварочных плавящихся флюсов. Для агломерированных флюсов с учетом их высокой стоимости предъявляются повышенные требования в части прочности гранул с целью повышения доли повторно использованных после сепарации отходов нерасплавленного при сварке флюса.

Работ, посвященных применению ШК агломерированных флюсов, в литературе немного. В работе [8] установлено, что агломерированный флюс, изготовленный из ШК, снижает легирование шва и, соответственно, прочностные свойства, в то время как его ударная вязкость зависит от конкретных условий. Поэтому его применение требует проведения контроля за качеством сварных соединений, технологией изготовления регенерированного флюса [9].

Наши исследования [10] показали возможность использования ШК, образующейся при многодуговой сварке под смесью алюминатно-основного агломерированного флюса ОР-132 и плавящего марганцево-силикатного флюса АН-60, взятых в соотношении 1:4, при изготовлении регенерированно-

**Таблица 1. Химический состав металла швов при сварке стали 10Г2ФБ под различными флюсами (мас. %) с использованием сварочной проволоки марки Св-08Г1НМА**

Флюс	Количество дуг	Номер шва	C	Si	Mn	Ni	Mo	Al	Nb	V	Ti	S	P
ОК 10.74	1	401	0,084	0,50	1,71	0,25	0,28	0,028	н/д	0,060	0,010	н/д	н/д
ОК 10.74	4	386	0,085	0,43	1,64	0,20	0,20	0,025	0,021	0,059	0,012	0,009	0,019
А	1	400	0,090	0,34	1,57	0,20	0,23	0,026	н/д	0,064	0,006	н/д	н/д
В	4	405	0,088	0,30	1,68	0,19	0,22	0,024	0,024	0,059	0,007	н/д	н/д
ОМ: 10Г2ФБ			0,103	0,25	1,57	0,20	<0,01	0,030	0,030	0,081	0,013	0,005	0,013

го флюса. Такой флюс имел хорошие формирующие свойства при однодуговой сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей со скоростью до 40 м/ч. Механические свойства наплавленного металла при сварке проволокой Св-08Г1НМА диаметром 4 мм, следующие:  $\sigma_T = 530,7$  МПа;  $\sigma_B = 649,4$  МПа;  $\delta = 25,3$  %;  $\psi = 63,7$  %;  $KCV$  при  $-20$  °С — (35,3...40,3)/37,7; при  $0$  °С — (41,2...47,1)/44,9; при  $20$  °С — (54,9...82,4)/71,8.

Однако этот флюс был непригоден для скоростной многодуговой сварки из-за высокого насыпного веса, являющегося причиной образования дефектов формирования швов. Кроме того, уровень ударной вязкости металла шва не удовлетворял требованиям к сварным соединениям хладостойких сталей.

Целью данной работы является анализ возможности использования ШК агломерированных флюсов для изготовления флюсов, обеспечивающих качественное формирование и высокие механические свойства металла шва при скоростной многодуговой сварке хладостойких низколегированных сталей.

В настоящее время трубные заводы используют агломерированные импортные флюсы преимущественно алюминатно-основного типа согласно классификации EN 760 марок ОР 132 («Oerlikon»), ОК 10.74 («ESAB»), 995N, 998 («Lincoln») и др. Учитывая высокую стоимость указанных флюсов, представляло практический интерес оценить возможность изготовления флюсов из образующейся при сварке ШК. В качестве объекта для исследований была взята ШК флюса ОК 10.74, образующаяся при многодуговой сварке трубных сталей проволокой Св-08Г1НМА.

Ниже описана методика работы по изготовлению регенерированного флюса. Из размолотой

ШК флюса ОК 10.74 были отобраны две фракции: 0,315...4,0 мм и  $\leq 0,315$  мм.

Затем была выполнена тщательная магнитная сепарация, в результате которой из фракции 0,315...4,0 мм ШК были удалены капли электродного металла и окалина. В результате был получен продукт, отвечающий по гранулометрическому составу плавленому флюсу марки АН-60. Аналогичная технология применялась в работах [6, 7] при изготовлении регенерированного флюса. Поэтому указанный выше материал мы условно обозначили как регенерированный флюс по варианту «А». Его насыпная масса составила  $1,72$  кг/дм<sup>3</sup>, что значительно превышает рекомендуемые для многодуговой сварки значения  $0,9...1,2$  кг/дм<sup>3</sup>. Зерно флюса имело размер 0,315...4,0 мм с преобладанием фракции размером 0,315...1,6 мм. Следует отметить, что эта фракция является типичной для большинства агломерированных и целого ряда плавленных флюсов. Перед сваркой флюсы прокаливали при  $400$  °С в течение 2 ч.

Из данных о химическом составе металла швов, сваренных под флюсом ОК10.74 (швы №№ 386, 401), и под регенерированным флюсом по варианту «А» (швы № 400) видно, что при использовании регенерированного флюса заметно снижается легирование металла шва по ряду элементов (табл. 1), причем наиболее существенным представляется уменьшение в нем содержания марганца.

С учетом полученных данных, в размолотую ШК фракции  $\leq 0,315$  мм после магнитной сепарации и проковки добавляли 5 % марганца металлического марки Мн-98 (фракция 0,2...0,4 мм), получая в интенсивном смесителе однородную сухую смесь. Затем на основе Na–K жидкостекольного связующего по известной технологии была изго-

**Таблица 2. Физические свойства флюсов**

Обозначение флюса	Размер гранул флюса, мм	Насыпная масса, кг/дм <sup>3</sup>	Примечание
А	0,315...4,0	1,72	Преобладание фракции 0,315...1,6 мм
В	0,2...4,0	1,26	Преобладание фракции 0,2...1,6 мм
ОК10.74	0,2...1,6	1,02	—

Т а б л и ц а 3. Режимы сварки с использованием проволоки Св-08Г1НМА диаметром 4 мм

Флюс	Количество дуг	Номер шва	$I/U$ , А/В	$v_{св}$ , м/ч	$q/v_{св}$ , кДж/мм	$B$ , мм
А (однодуговая сварка)	1	400	720...750/39...40	23,5	4,4	21
В (однодуговая сварка)	1	403	850...880/36...37	24,0	4,7	25
	1	402	820...850/38...39	24,0	4,8	27...28
В (четырёхдуговая сварка)	1	405	1150/35...36	99,2	4,5	25
	2		800...850/35			
	3		650...700/38			
	4		700/38...40			
ОК10.74 (однодуговая сварка)	1	401	820...830/37	23,5	4,7	30
ОК10.74 (четырёхдуговая сварка)	1	386	1150/33	98,0	4,5	25
	2		900/35			
	3		700/40			
	4		600/43			

Примечание. Межэлектродные расстояния при четырёхдуговой сварке составляли 15...21 мм ( $q/v_{св}$  – погонная энергия процесса сварки;  $B$  – ширина шва).

товлена партия агломерированного флюса. Насыпная масса полученного флюса, обозначаемого далее как «В», составила 1,26 кг/дм<sup>3</sup> (табл. 2).

Флюсы оценивали по формированию наплавов, а также по химическому составу и ударной вязкости контрольных швов, выполняемых на односторонних стыковых соединениях из стали 10Г2ФБЮ толщиной 19 мм с V-образной разделкой 5 мм×90°. Режимы одно- и двухдуговой сварки с использованием проволоки Св-08Г1НМА диаметром 4 мм приведены в табл. 3.

Процесс сварки под флюсом «А» был нестабильным с выплесками и формированием высокого узкого гребня ШК. Полученный шов (№ 400) имел высокое усилие с неплавным переходом к основному металлу и небольшими подрезами. Такое формирование шва связано, по-видимому, с повышенной насыпной массой флюса (1,72 кг/дм<sup>3</sup>).

При сварке под флюсом «В» стабильность процесса и качество формирования швов, выполненных одно- и четырёхдуговой сваркой, были удовлетворительными. Фотографии швов приведены на рис. 1.

Шов № 400, выполненный однодуговым процессом сварки, сваренный под регенерированным флюсом «А», показал достаточно высокую ударную вязкость ( $KCV_{-40} = 62,6$  Дж/см<sup>2</sup>), однако, как указывалось, по внешнему виду сварной шов имел недостатки.

Шов № 405, выполненный четырёхдуговой сваркой под агломерированным флюсом «В», имел удовлетворительные свойства. По химическому составу, за исключением кремния, он близок к шву № 386, выполненному четырёхдуговым процессом сварки, под оригинальным флюсом ОК10.74 (табл. 1), а по ударной вязкости (табл. 4) лишь ненамного ему

уступает. Среднее ее значение для шва по варианту «В» ( $KCV_{-40} = 81,8$  Дж/см<sup>2</sup>) является вполне приемлемым. Возможным резервом для обеспечения более высокой ударной вязкости швов при температурах –40 °С и ниже является легирование Ti–В.

Морфологию и особенности распределения в швах неметаллических включений (НМВ) исследовали на нетравленных шлифах с полированной поверхностью при увеличении 800. Установлено, что основная масса НМВ расположена относительно равномерно и представляет собой мелкие глобулярные оксиды сложного состава, состоящие из Mn, Al, Si, Ti, Ca, Fe в различных соотношениях.

В шве № 386, сваренном под флюсом ОК 10.74, размер большей части НМВ составляет 1,0...1,2 мкм (рис. 2, а). В отдельных полях зре-



Рис. 1. Внешний вид швов, выполненных одно- (а) и четырёхдуговым (б) процессом сварки, сваренных под флюсом «В» из ШК флюса ОК 10.74 (×1,5)



Таблица 4. Ударная вязкость металла швов при сварке стали 10Г2ФБ

Флюс	Количество дуг	Номер шва	KCV, Дж/см <sup>2</sup>		
			–20 °C	–40 °C	–60 °C
ОК 10.74	4	386	$\frac{106,2...203,7}{162,9}$	$\frac{77,1...101,2}{92,9}$	$\frac{43,5...77,3}{60,6}$
А	1	400	$\frac{95,2...109,1}{100,7}$	$\frac{53,7...69,5}{62,6}$	$\frac{33,4...55,5}{44,0}$
В	4	405	$\frac{85,1...162,0}{115,7}$	$\frac{60,8...96,8}{81,8}$	$\frac{30,3...71,1}{54,6}$

ния наблюдаются 1...2 более крупных включения величиной около 1,5 мкм (рис. 2, б). При сварке под регенерированным флюсом по варианту «А» (швы № 400) общее количество НМВ незначительно увеличивается. Их размер составляет преимущественно 1,0...1,6 мкм (рис. 2, в). При этом возрастает также количество и размер крупных (более 1,5 мкм) включений, с большим содержанием кремния (рис. 2, г).

В шве № 405, сваренном под агломерированным флюсом по варианту «В», количество, распределение и размеры НМВ близки к шву № 386,

выполненному под исходным флюсом ОК 10.74, причем силикатные включения, наблюдавшиеся в шве № 400, отсутствуют (рис. 2, д, е).

Особенности состава и морфологии структурных составляющих швов исследовали на шлифах после их травления в 4%-м спиртовом растворе азотной кислоты при увеличении 100 и 500. Микроструктура швов состоит из смеси различных форм феррита в различном их соотношении. Так, в шве № 386, сваренном под флюсом ОК 10.74, основной структурной составляющей является игольчатый феррит. Доля зернограницного поли-

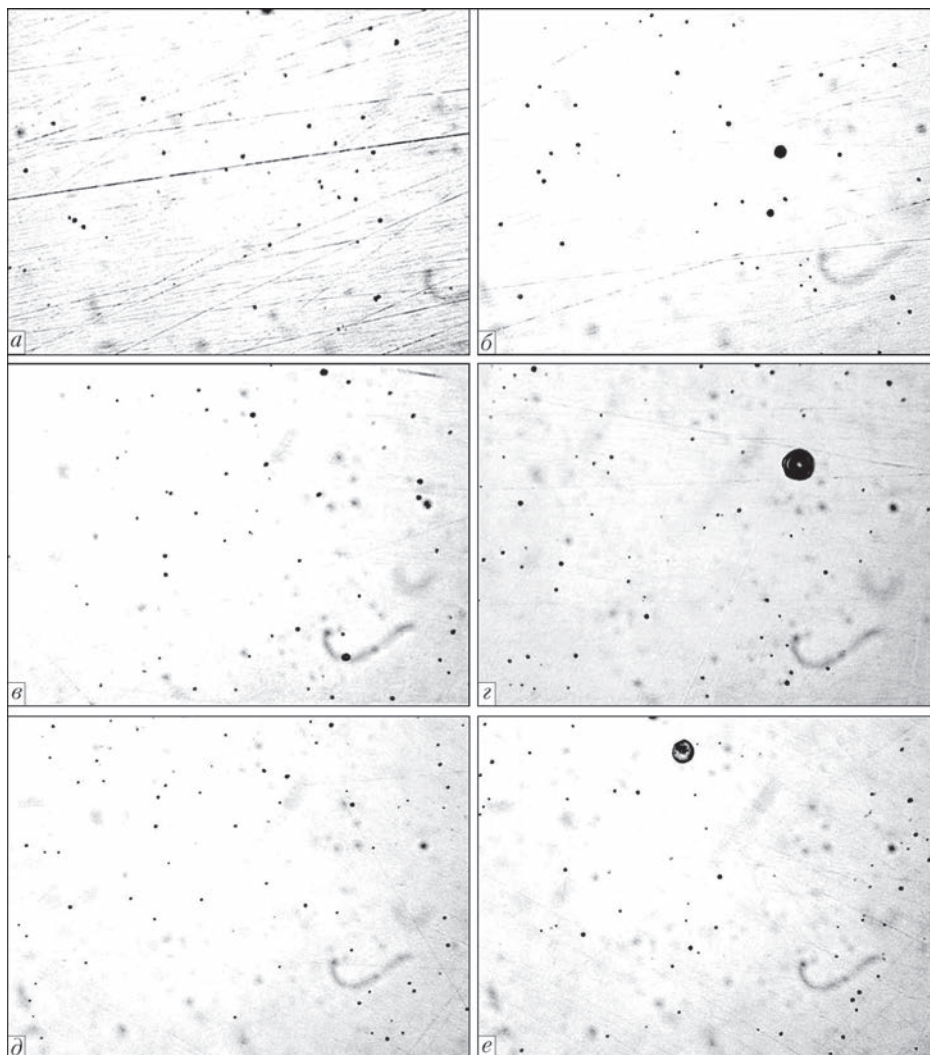


Рис. 2. Микроструктура (×800) НМВ в металле исследованных швов: а, б — шов № 386; в, г — 400; д, е — 405

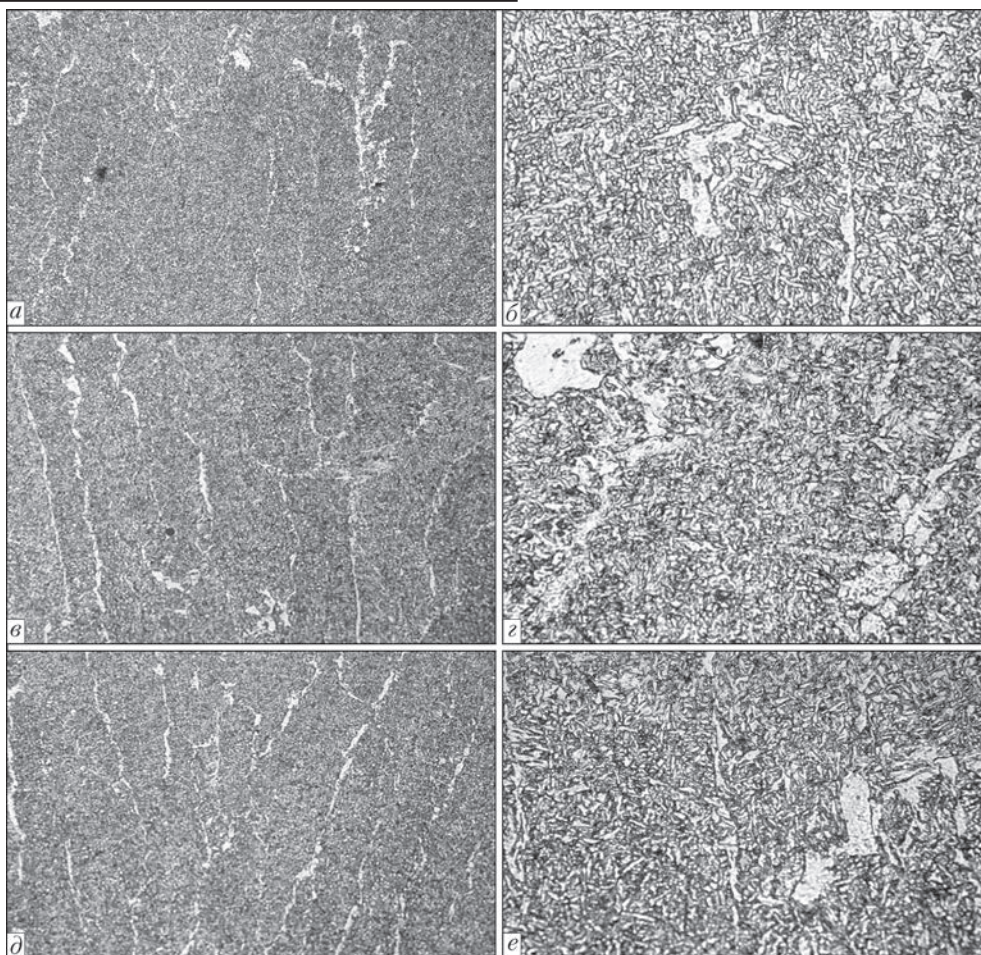


Рис. 3. Микроструктура металла исследованных швов: *а, б* — шов № 368; *в, з* — 400; *д, е* — 405 (*а, в, д* —  $\times 100$ ; *б, з, е* —  $\times 500$ )

гонального феррита, выделяющегося по границам в виде прослоек шириной от 6 до 16 мкм или цепочек отдельных зерен, не превышает 6 % (рис. 3, *а, б*). Наблюдаются также единичные участки внутризеренного полигонального феррита, в том числе относительно крупные образования массивного феррита с неупорядоченной МАК-фазой (рис. 3, *б*), которая выделяется также по границам наиболее крупных образований зернограницного и внутризеренного полигонального феррита.

В шве № 400, сваренном под регенерированным флюсом по варианту «А», доля зернограницного полигонального феррита увеличивается до 10...12 % (рис. 3, *в*). Увеличиваются также размеры образований внутризеренного массивного полигонального феррита, а ширина прослоек межзеренного полигонального феррита возрастает до 18...20 мкм (рис. 3, *з*), в связи с чем повышается количество скоплений МАК-фазы на их границах.

Микроструктура шва № 405, выполненного под агломерированным флюсом по варианту «В», близка к микроструктуре шва № 386, сваренного под флюсом ОК 10.74. Доля зернограницного полигонального феррита здесь несколько выше и составляет 7...9 %, а ширина его прослоек не превышает 18 мкм (рис. 3, *д, е*). Размеры образований

массивного внутризеренного феррита с выделениями МАК фазы незначительно превышают размеры этой структурной составляющей в шве № 386 (рис. 3, *е*).

Микротвердость исследованных швов №№ 386, 400 и 405 находилась примерно на одном уровне и составляла  $HV_5$  — 227...230,  $HV_5$  — 219...221 и  $HV_5$  — 221...227, соответственно.

Таким образом, металлографическое исследование показало, что применение регенерированного флюса по варианту «А», изготовленного из ШК, по сравнению с оригинальным флюсом приводит к ухудшению структуры шва. В то же время структура шва, полученного при сварке под агломерированным флюсом, изготовленным из ШК флюса ОК 10.74 с дошихтовкой 5 % металлического марганца (вариант «В»), по всем исследованным параметрам близка к структуре шва, сваренного под оригинальным флюсом.

### Выводы

Проведено исследование возможности использования ШК, образующейся при многодуговой сварке под агломерированным алюминатно-основным флюсом, для изготовления сварочных флюсов. На



основе ШК флюса ОК 10.74 были изготовлены опытные флюсы по технологии регенерации (дробление ШК с последующим рассевом и магнитной сепарацией) и по технологии агломерирования с дошихтовкой 5 % металлического марганца.

Проведено сравнительное исследование сварочно-технологических свойств оригинального флюса ОК 10.74 и опытных флюсов при одно- и четырехдуговой сварке. Изучены химические составы металла швов, распределение в них неметаллических включений, особенности микроструктуры и определены показатели ударной вязкости металла швов.

Установлено, что флюс, изготовленный по методу агломерации с добавкой в состав шихты 5 мас. % марганца металлического, по всем этим показателям, включая ударную вязкость металла шва, близок к оригинальному флюсу ОК 10.74 и отвечает требованиям к сварным соединениям холодостойких газопроводных труб из сталей категории прочности до Х80 включительно.

Применение флюса, изготовленного из ШК, по технологии регенерации, сопровождается определенным снижением уровня ударной вязкости металла шва и некоторым ухудшением внешнего вида сварного шва по сравнению со сваркой под оригинальным флюсом ОК 10.74. Поэтому решение о возможности использования регенерированного флюса при сварке должно приниматься в ка-

ждом конкретном случае с учетом требований к качеству сварных соединений.

1. О форме существования водорода в сварочных плавильных флюсах / И.А. Гончаров, В.С. Токарев, А.П. Пальцевич и др. // Автомат. сварка. – 2001. – № 4. – С. 28–32.
2. Подгаецкий В.В. Как использовать шлаковую корку // Там же. – 1961. – № 6. – С. 93–94.
3. Регенерация отходов флюса в трубосварочном производстве / В.Н. Колисник, В.И. Галинич, В.Г. Кузьменко и др. // Там же. – 1969. – № 8. – С. 66–67.
4. Использование шлаковой корки для выплавки флюса АН-60 / В.И. Галинич, В.Н. Колисник, В.Ю. Котенжи и др. // Там же. – 1964. – № 11. – С. 86–91.
5. Кузьменко В.Г., Гончаров И.А. Особенности образования шлаковой корки при дуговой сварке // Там же. – 1997. – № 12. – С. 7–13.
6. Гончаров И.А., Токарев В.С., Кузьменко В.Г. Разработка флюса общего назначения на базе шлаковой корки флюса АН-60 // Прогресивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва. – Т. IV. – Київ: НТТУ «Київський політехнічний інститут», 1998. – С. 227–231.
7. Гончаров И.А., Пальцевич А.П., Токарев В.С. Низководородный сварочный флюс, обеспечивающий повышенную стойкость сварных швов к порообразованию // Сварщик. – 2002. – № 1. – С. 12–13.
8. Murlin D. The use of crushed slag as submerged arc welding flux // Welding J. – 2010. – № 8. – P. 41–44.
9. H.P. Beck, A.R. Jackson. Recycling SAW slag proves reliable and repeatable // Ibid. – 1996. – № 6. – P. 51–54.
10. Гончаров И.А., Токарев В.С. Разработка регенерированного сварочного флюса на основе шлаковой корки флюса ОР-132 // Матеріали міжнарод. науч.-техн. семінара «Современные сварочные флюсы и опыт их применения в промышленности». – Запорожье, 29–31 авг. 2005 г. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2005. – С. 9, 10.

Поступила в редакцию 28.12.2015



Ассоциация «Электрод»

ООО Промышленная  
компания «ХОБЭКС электрод»



при поддержке

Российского научно-технического сварочного общества и Общества сварщиков Украины

**IX Международная конференция «Дуговая сварка. Материалы и качество»**  
Посвящается 50-летию Первой всесоюзной конференции  
по сварочным материалам (1966 г.)  
и 25-летию создания ассоциации «Электрод» (1990 г.).

31 мая – 3 июня 2016 г.

г. Волгоград

Тематика конференции

- Совершенствование дуговых процессов сварки
- Разработка инновационных сварочных материалов
- Технологии производства материалов и подготовка кадров
- Качество и конкурентоспособность материалов

<http://association-electrode.com>; тел./факс: (+38044) 200 63 02.

E-mail: [office@association-electrode.com](mailto:office@association-electrode.com)

Информационная поддержка: журнал «Автоматическая сварка»



## ПОКОРЕНИЕ ТАНКОВОЙ БРОНИ

В 1939 г. в Институте электросварки под руководством Е.О. Патона был создан новый вид сварки — автоматическая сварка плавящимся электродом под слоем флюса. Производительность процесса превысила ручную дуговую сварку в 10 раз. Первый отечественный способ был создан для сварки конструкционных сталей и к середине 1941 г. был внедрен на 20 крупнейших заводах СССР. В США, где процесс сварки под флюсом был запатентован на несколько лет раньше, к этому времени автоматическая сварка под флюсом использовалась только на трех заводах.

С 1930-х годов в преддверии новой мировой войны перед научно-техническим прогрессом стояла задача производства вооружения — наиболее совершенного и в большом количестве. Особых успехов достигли в Германии, где для облегчения веса корпуса крейсеров с успехом заменили клепаные конструкции на сварные. Такая технология позволила довести артиллерийское вооружения крейсеров до уровня линкоров и не нарушить запрет Версальского договора, ограничившего водоизмещение кораблей побежденной Германии. Чтобы узнать секреты сварки брони (и не только поэтому) И.В. Сталин распорядился купить германские «карманные линкоры». Германия согласилась продать только один тяжелый крейсер — «Лютцов». 31 мая 1940 г. германские буксиры привели крейсер в Ленинград на Балтийский завод (№ 189). Управление кораблестроения Наркомата ВМФ считало крейсер «весьма ценным приобретением». Однако оказалось, что бортовая броня не была включена в конструкцию корпуса, была частично приклепана и приварена штучными электродами вручную, что с успехом делали и на советских заводах.

В 1940 г. Председатель СНК СССР приказал внедрить автоматическую сварку в производство танков. Е.О. Патон поручил группе В.И. Дятлова разработать технологию по заданию Харьковского паровозостроительного завода (завод № 183 им. Коминтерна), в конструкторском бюро которого был создан танк Т-34 (как потом выяснилось, лучший средний танк Второй мировой войны). Однако ни в ИЭС, ни в заводской лаборатории не удалось найти положительного решения. Попытки применить новый вид соединений для сварки ле-

гированных броневых сталей заканчивались саморазрушением шва — броневые плиты толщиной несколько десятков миллиметров в СССР, США, Германии и других странах соединяли многослойными швами ручной дуговой сваркой специальными аустенитными электродами.

Нападение Германии и ее сателлитов на СССР вынудило свернуть и эвакуировать промышленное производство в Украине. Работа ИЭС была прервана и автоматическую сварку броневых сталей разработать не успели.

6 ноября 1941 г. И.В. Сталин в докладе на заседании Московского Совета депутатов трудящихся города Москвы, оценивая ситуацию, сложившуюся в начале войны, в частности, отметил: «...Другая причина временных неудач нашей армии состоит в недостатке у нас танков и отчасти авиации... Наши танки по качеству превосходят немецкие танки, а наши славные танкисты и артиллеристы не раз обращали в бегство хваленые немецкие войска с их многочисленными танками. Но танков у нас все же в несколько раз меньше, чем у немцев. В этом секрет временных успехов немецкой армии. Нельзя сказать, что наша танковая промышленность работает плохо и подает нашему фронту мало танков. Нет, она работает очень хорошо и вырабатывает немало превосходных танков. Но немцы вырабатывают гораздо больше танков, ибо они имеют теперь в своем распоряжении не только свою танковую промышленность, но и промышленность Чехословакии, Бельгии, Голландии, Франции». [Комаров Н.Я. Государственный Комитет Обороны постановляет. Документы. Воспоминания. Комментарии. М., 1990. — С. 422]\*. И в то же время Сталин, сославшись на плохие тактико-технические данные, отказался от поставки по ленд-лизу американских и английских танков. [Переписка Председателя Совета Министров СССР с президентами США и премьер-министрами Великобритании во время Великой Отечественной войны 1941–1945 гг. — М.: Политиздат, 1976. — Т.2. — 327 с.].

В августе 1941 г. при приближении немецко-фашистских армий к Киеву ИЭС был эвакуирован на Урал, в Нижний Тагил и размещен на территории «Уралвагонзавода». Здесь автоматическую сварку внедрили в производство грузовых вагонов и авиабомб большого калибра. Вскоре сюда же прибыли эшелоны с оборудованием и специалистами Харьковского завода № 183. И завод получил наименование «Уральский танковый завод им. Коминтерна» (УТЗ № 183). Производ-

\*От редакции. Превосходство немецкой армии в танках не соответствует данным современной исторической науки (см. В. Суворов. Ледокол. Кто начал Вторую мировую войну? — Изд-во: «Добрая книга». — 608 с.)



Они сваривали танки с 1941 по 1944 годы в г. Нижний Тагил (сидят: Волошкевич Г.З., Севбо П.И., Патон Б.Е., Сидоренко М.И., Аснис А.Е., Тищенко М.И., Грохотов М.М.; стоят: Александров М.Ф., Рабкин Д.М., Фриде К.К., Островская С.А., Патон В.Е., Гутман Л.М., Слуцкая Т.М.)

ство танков разворачивалось и на заводах Сталинграда, Свердловска, Сормовском и других. В конце 1941 г. уже работали 8 танковых, 6 отдельных корпусных и 3 дизельных завода. «Узким» местом были бронекорпусные цеха. На сварке толстых броневых плит вручную специальными штучными электродами были заняты сотни квалифицированных рабочих.

Е.О. Патон развернул изучение особенностей сварки высокопрочных закаленных сталей. Исследовались металлургические реакции в ванне, структурные преобразования и др. Борис Евгеньевич Патон вспоминает: «Основные трудности, которые тормозили работу по созданию технологии сварки броневых сталей и четко проявились при проведении опытов в Нижнем Тагиле, заключались в возникновении в металле шва и зоне термического влияния трещин. «Броня, она всегда броня», — сетовали кругом. Большое разочарование приносили и поры. Когда казалось, что трещины уже побеждены, они появлялись снова. Работа начиналась заново, а листья календаря немолимо сообщали о том, что еще неделя канула в Лету. Наконец, в результате упорного труда бригада технологов, руководимая В.И. Дятловым, победила трещины». [Патон Б.Е. Шов длиной в 4000000 метров // В кн. Т-34: путь к победе. Воспоминания танкостроителей и танкистов. — Киев: Изд-во полит. лит-ры Украины, 1989. — 255 с.].

Действительно, в ноябре 1941 г. В.И. Дятлову и сотруднику харьковского завода Б.А. Иванову впервые в мире удалось решить проблему дуговой сварки под флюсом броневых сталей — дозированно вводить в сварочную ванну низкоуглеродистую проволоку или присадочные материалы другой формы.

В январе 1942 г. В.И. Дятловым был открыт закон саморегулирования дугового процесса. Он установил, что скорость плавления электрода при определенных условиях сохраняется постоянной без ее регулирования автоматом. На основе этого явления впервые в мире был создан новый класс сварочных аппаратов для дуговой сварки — одномоторных аппаратов с постоянной скоростью подачи плавящегося электрода. Была разработана упрощенная конструкция головки для сварки под флюсом (А-80, П.И. Севбо), исследована и разработана система управления — дуга, подача электрода, источник питания (Б.Е. Патон). [Патон Б.Е. О рациональном выборе электрических схем управления электросварочными установками // Автоген. дело. — 1945. — № 11/12. — С. 14–15]. Несмотря на колебание напряжения в электрических сетях упрощенные автоматические сварочные аппараты работали стабильно и высокое качество шва было гарантировано. Простота изготовления и эксплуатации аппаратов открывали возможность широкого внедрения автоматической сварки.

Проблема сварки броневых сталей была решена. Однако новаторское предложение внедрить новую технологию для сварки танковых корпусов было встречено с недоверием. Руководство завода не хотело рисковать, не спешило заменять опытных сварщиков-ручников мальчиками и девочками, которые только что научены управлять сварочными автоматами. Ведь в случае неудачи, в случае, если корпус окажется с дефектами, и из-за новой неизвестной технологии будет сорван выпуск танков, это могли расценить как саботаж и наказать по всей строгости военного времени. И первым был бы наказан «старый спец», который вырос и учился в Германии.

Но фронт нуждался в танках и перспективу быть наказанным Е.О. Патон проигнорировал и потребовал организовать сравнительные натурные испытания. После жесточайшего обстрела оказалось, что «автоматные» швы прочнее «ручных». В феврале 1942 г. нарком танкостроения В.А. Малышев издал приказ о внедрении автоматической сварки в промышленность.

Конструкторская группа ИЭС (П.И. Севбо, В.Е. Патон и др.) подготовила 28 проектов специализированных установок для сварки разных узлов танков, авиабомб и боеприпасов. Еще одним заметным достижением стало создание поточной сборочно-сварочной линии. Производительность автоматической сварки была в 10 раз выше, чем ручной. Например, вручную квалифицированные сварщики приваривали днище к борту 20 ч. Подросток, после 5–10 дней обучения работы на автоматических головках выполнял эту работу за 2 часа. Экономия электроэнергии составила 42 %. Только на Уральском танковом заводе было высвобождено 250 сварщиков. [Медовар Б.И. Работа Института электросварки АН УССР в годы Великой Отечественной войны // Сборник, посвященный 75-летию со дня рождения и 50-летию научной деятельности Е.О. Патона. – Киев: Изд-во АН УССР, 1946. – 376 с.] [Сойбельман М.И., Портной И.Д. Автоматизация сварочных процессов в бронекорпусном производстве завода // Сборник, посвященный 75-летию со дня рождения и 50-летию научной деятельности Е.О. Патона. – Киев: Изд-во АН УССР, 1946. – С. 39–41].

Е.О. Патон обобщил достижения и издал монографию с анализом результатов новых научных исследований и опыта промышленного применения. [Патон Е.О. Скоростная автоматическая сварка под слоем флюса: 3-е изд. – М.; Л.: Машгиз, 1942. – 110 с.].

Фундаментальным вкладом мирового значения в развитие металлургии сварки можно назвать результаты поиска шихтовых материалов флюсов из местного доступного сырья. Специалистами ИЭС



(А.И. Коренным, В.И. Дятловым) предложено использовать шлак Ашинского металлургического завода с добавлением марганцевой руды. К лету 1942 г. страна получила новый сварочный материал вместо флюса АН-2, запасы которого были на исходе.

В 1943–1944 гг. Б.Е. Патон и А.М. Макара исследовали процесс сварки под флюсом, в том числе с использованием осциллографирования. Результаты исследований послужили дальнейшему развитию металлургии сварки, основой для развития сварки под флюсом и в защитных газах [Патон Б.Е., Макара А.М. Экспериментальное исследование процесса автоматической сварки под слоем флюса. – Киев: ИЭС, 1944. – 92 с.]. В 1943 г. опубликована первая в мире монография по сварке бронеконструкций под флюсом. [Патон Е.О. Руководство по автоматической сварке бронеконструкций. – Институт электросварки АН УССР, 1943. – 139 с.].

Решение металлургических проблем производства бронеконструкций в 1941–1944 гг. можно отнести к первому этапу развития металлургии броневых сталей для танкостроения. В архивах заводов, институтов и Национальной академии наук Украины сохранились сотни протоколов совещаний, посвященных вопросам создания составов броневых сталей, технологиям их производства и изготовления бронеконструкций.

Эти успехи подтвердили правильность заложенного Евгением Оскаровичем Патоном принципа самостоятельного комплексного решения сложных проблем техники от научных фундаментальных исследований до практической реализации. Следует отметить, что прорывные решения не только отвечали текущим потребностям. В скором времени опыт металлургических, электрофизических и других исследований, конструирования аппаратов, создания поточных линий, организации научной и производственной рабо-



ты будет развит. Техника с постоянной скоростью подачи плавящегося электрода продолжала совершенствоваться и в послевоенное время, использовалась в ИЭС им. Е.О. Патона для инновационных технологий сварки в защитных газах, электрошлаковой сварки, специальной электрометаллургии.

В США только в 1944 г. сумели разработать технологию автоматической сварки броневых сталей. В Германии вся бронетехника сваривалась ручными электродами, причем качество соединений было невысоким. К этому времени ИЭС установил на заводах Наркомата танковой промышленности 52 аппарата для автоматической сварки и все советские танки сваривались автоматами под флюсом. [Патон Б.Е. Развитие автоматической электросварки под флюсом за годы войны // Электричество. – 1945. – № 3. – С. 3–5]. [Патон Е.О. Воспоминания / Лит. запись Ю. Буряковского. – Киев: Гослитиздат Украины, 1955. – 324 с.]

В марте 1943 г. за выдающиеся достижения в ускорении производства танков и металлоконструкций Е.О. Патону присвоено звание Героя Социалистического труда. Ордена получили А.И. Коренной, И.К. Олейник, Б.Е. Патон, П.И. Севбо, А.М. Сидоренко.

Характеризуя работу руководителя Института, Б.Е. Патон написал: «Стремились понять, что помогло нашему небольшому, плохо одетому, скудно питавшемуся товариществу с честью выполнить свой долг перед народом, перед страной. Прежде всего, это четкое и целеустремленное руководство. Директор не терпел застоя и бесплодного топтания на месте. Он умел сам и научил нас гибко менять направление главного удара в зависимости от новых данных, от веления времени. Для всех молодых членов коллектива (а их было большинство) совместная работа с Евгением Оскаровичем была неоценимым даром. Общение с ним и с танкостроителями стало для нас отличной школой. Из нее мы вышли сложившимися людьми и неплохими специалистами. Нас вдохновляло единое для всех советских людей стремление: сжав зубы, напрячь все силы и победить во что бы то ни стало. Помогало в решении сложных вопросов чувство товарищества, единства, взаимоуважения.» [Патон Б.Е. Шов длиной в 4000000 метров // В кн. Т-34: путь к победе. Воспоминания танкостроителей и танкистов. – Киев: Изд-во полит. лит-ры Украины, 1989. – 255 с.]

А.П. Лютый, канд. техн. наук

# ММС100

7–10 June 2016,  
Kyiv, Ukraine

[www.medovar100.org](http://www.medovar100.org)



## Международный симпозиум к 100-летию со дня рождения Б.И. Медовара

**Дата проведения**

7–10 июня 2016 г.

**Тематика симпозиума**

ЭШП и другие процессы специальной электрометаллургии, их научные основы, технологии и оборудование; электрошлаковое литье; сварка высоколегированных и высокопрочных сталей, а также аустенитных сталей и сплавов; теория кристаллизации сталей и сплавов; управление затвердением в металлургии и сварке; крупные кузнечные и листовые слитки; моделирование затвердевания в процессах специальной электрометаллургии и сварки; современные стали для магистральных газопроводов, сосудов давления, крупных поковок, роторов, валков; родственные области металлургии, сварки и металловедения.

**Место проведения**

Киев, Украина, Президент Отель

**Организационный комитет**

Тел.: +38(044) 287-52-18, +38(044) 337-30-81. Тел./факс: +38(044) 337-30-82  
E-mail: [org@medovar100.org](mailto:org@medovar100.org), [info@medovar100.org](mailto:info@medovar100.org)  
Дополнительная информация на сайте симпозиума [www.medovar100.org](http://www.medovar100.org)

## ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

**Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины**



**Жерносеков А.М.** (Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины) защитил 28 декабря 2015 г. докторскую диссертацию на тему «Повышение эффективности сварочных процессов путем применения специализированных импульсных воздействий».

Диссертация посвящена развитию научных основ повышения эффективности сварочных технологий путем применения импульсных воздействий на процессы дуговой сварки.

В работе получил дальнейшее развитие принцип разделения импульсного теплового и импульсного силового воздействия на сварочный процесс. Определено, что реализация этого принципа при рациональном выборе параметров импульсов не допускает интенсивное испарение металла капли, что увеличивает эффективность плавления электрода в 1,5...1,85 раза на обратной полярности. Показано существование множественности устойчивых форм капли электродного металла заданного объема, которая находится на торце электрода, а также развито представление о технологических циклах формирования и переноса металла электрода в результате действия специализированного многоуровневого импульса.

Установлено, что уменьшение длительности фронтов импульса сварочного тока при сварке с плавящимся электродом может приводить к нарушению газовой защиты. Даны рекомендации по выбору длительности фронтов импульсов.

В работе предложено при сварке конструкционных сталей комбинировать различные виды переноса металла: мелкокапельный перенос в смеси на основе аргона и перенос с короткими замыканиями дугового промежутка в углекислом газе. Это достигается путем одновременной импульсной подачи в зону сварки различных защитных газов и изменения при этом рода сварочного тока: импульсный и постоянный. Это позволяет воздействовать на параметры сварных швов и их микроструктуру.

Для улучшения формирования сварного шва, увеличения глубины проплавления и уменьшения теплового воздействия на свариваемый металл эффективно применение импульсной дуги, которая питается специализированными многоуровневыми импульсами с частотой следования равной

либо кратной частоте импульсов лазерного излучения. Автоколебательные режимы перспективно использовать при разработке новых дуговых и лазерно-дуговых технологий подобных импульсно-дуговой сварке и сварке модулированным током, так как для их реализации не требуется применение высокоточных электронных ключей.

Получили дальнейшее развитие принципы импульсной стабилизации дуги переменного тока за счет их оптимизации. Установлено, что источники питания трансформаторного типа с импульсной стабилизацией сварочной дуги генерируют в электрическую сеть минимальное количество высших гармоник, что открывает перспективу создания конкурентоспособных источников питания на базе сварочных трансформаторов, а также применения переменного тока для сварки ответственных конструкций.



**Лендел И.В.** (Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины) защитил 29 декабря 2015 г. кандидатскую диссертацию на тему «Дуговая наплавка в углекислом газе с импульсной подачей электродной проволоки».

Диссертационная работа посвящена повышению эффективности дуговой наплавки в среде углекислого газа за счет применения импульсной подачи электродной проволоки (ИПЭП), улучшению ее технологических и энергетических характеристик, изучению переноса электродного металла под действием силы инерции, определению влияния параметров ИПЭП на геометрические и служебные характеристики валика наплавленного металла, ресурсо- и энергосбережение.

Определены основные актуальные задачи процесса дуговой наплавки в углекислом газе на обратной полярности, заключающиеся в необходимости управления геометрическими размерами наплавленного валика, снижения глубины проплавления, повышения стабильности и уменьшения уровня потерь электродного металла. Для решения этих задач обоснована целесообразность применения ИПЭП.

Разработана оригинальная методика оптимизации исследовательского процесса, с применением метода ПФЭ определено и за счет декомпозиции четырехфакторного пространства сведено к минимуму количество необходимых экспериментов. Также разработана методика определения оптимальных параметров ИПЭП в зависимости

от требуемых целевых функций (геометрические размеры, потери электродного металла, затраты электроэнергии) и энергетических параметров процесса (тока и напряжения), используя данные по длине дуги, объему капли и закономерности влияния параметров ИПЭП на целевую функцию.

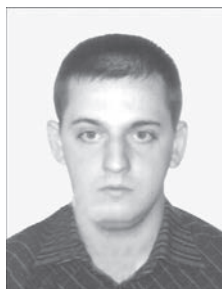
Для сплошной электродной проволоки Св-08Г2С диаметром 1,2 мм, с позиций минимизации глубины проплавления основного металла и потерь электродного металла, в диапазоне тока 120...310 А и напряжения 20...33 В установлен рациональный диапазон изменения параметров ИПЭП для процесса наплавки, который составляет по частоте 10...30 Гц и скважности 3...5 ед.

Проведены исследования влияния параметров ИПЭП на перенос электродного металла, получены и верифицированы регрессионные математические модели, которые могут использоваться для прогнозирования геометрических размеров (выпуклости, ширины, глубины проплавления основного металла, угла сопряжения) валика наплавленного металла, потерь электродного металла и затрат электроэнергии в зависимости от частоты и скважности ИПЭП. Достоверность моделей находится на уровне 80 %. Выполнена сравнительная оценка служебных характеристик наплавленного слоя, которая показала возможность получения износостойкости пятислойной наплавки при постоянной подаче электродной проволоки уже в первом слое при ИПЭП и на 30 % — повышения износостойкости пятислойной наплавки соответственно. Установлено, что за счет принципиального различия в подаче электродной проволоки ИПЭП дает возможность снизить потребление электроэнергии на 10...20 %. Оценка температуры на стадии роста капли при ИПЭП на оптимальных режимах наплавки через теплосодержание капли показала возможность ее снижения на 25 %. Это в свою очередь не создает предпосылок к чрезмерному перегреву капли, до 30 % уменьшает остаточные напряжения при наплавке валика, улучшает санитарно-гигиенические характеристики процесса наплавки за счет уменьшения в 1,1...1,5 раза скорости образования сварочных аэрозолей. Снижение разбрызгивания электродного металла в 2...3,5 раза объясняется существенным повышением стабильности процесса на стадии роста капли, подтвержденным уменьшением коэффициентов вариации и среднеквадратичного отклонения в 5,1 и 4,4 раза соответственно.

Разработан новый подход к созданию механизма ИПЭП без обратной связи с источником сварочного тока, создан макетный малогабаритный образец на базе ВРЭД «Импульс-2 ПМ-80». Механизм способен периодически с частотой 1...60 Гц реализовывать на торце оплавленного электро-

да необходимые значения силы инерции за счет уменьшенной продолжительности торможения электродной проволоки. Данный механизм ИПЭП рассчитан на подачу электродной проволоки диаметром 1,2 мм с частотой 1...60 Гц и отличается от уже существующих расширенными технологическими характеристиками подачи электродной проволоки по скважности 1...10 ед., по шагу 0,1...7,2 мм. Устройство имеет автономный режим работы, параметры которого отдельно задаются на циклограмме, содержащей до 10 участков, а также 3 адаптивных режима работы, позволяющих действовать приводу под управлением внешних ведущих устройств и способствующих его интеграции в модульное сварочное оборудование под общей системой управления.

Основными преимуществами предлагаемого способа ИПЭП является ограничение глубины проплавления, уменьшение количества сломов наплавленного металла, снижение потерь на разбрызгивание электродного металла. Показана принципиальная возможность ресурсосберегающего и экономически эффективного ремонта и восстановления деталей в производственных условиях.



**Молтасов А.В.** (Ин-т электро-сварки им. Е.О. Патона НАН Украины) защитил 29 декабря 2015 г. кандидатскую диссертацию на тему «Разработка методов расчета силовых параметров контактной стыковой сварки кольцевых изделий».

Диссертация посвящена разработке аналитических и инженерных методов расчета усилий, возникающих вследствие изгиба контура шунтирования при устранении первоначального зазора, высадке оплавленного металла и последующей осадке в процессе контактной стыковой сварки (КСС) кольцевых изделий, с учетом нагрева периферии изделия токами шунтирования.

Путем преобразований уравнений Бельтрами–Митчелла установлена функциональная взаимосвязь между функциями напряжений трехмерной и плоской задач теории упругости в цилиндрических координатах.

На основании методов и подходов механики деформируемого твердого тела установлена связь между величиной усилия, затрачиваемого на изгиб шунтирующей части, и геометрическими параметрами заготовок колец при КСС оплавлением. Показано, что для восьми шпангоутов различных геометрических размеров из стали 12Х18Н10Т это усилие составляет до 70 % от усилия осадки.



се КСС пульсирующим оплавлением исследуемых шпангоутов.

Разработан метод определения разрывного усилия, обусловленного накопленными в шунтирующей части шпангоута упругими деформациями в процессе его КСС. Исследован характер распределения остаточных напряжений в шунтирующей части сваренного шпангоута после выполнения КСС оплавлением. Показано, что в некоторых объемах материала большинства исследуемых шпангоутов уровень остаточных напряжений достигает его предела текучести.

Разработан инженерный метод определения изгибного и разрывного усилий при КСС кольцевых изделий с поперечным сечением произвольной геометрической формы и других изделий замкнутой формы отличной от кольца. Применение предложенного метода продемонстрировано на примере расчета силовых параметров процесса КСС поворотного круга из стали 60 с поперечным сечением сложной геометрической формы и концевой звена якорной цепи калибра 22 из стали 20Х.

Исследовано влияние нагрева внешней части свариваемого кольца токами шунтирования на силовые параметры процесса КСС. Предложена

методика описания температурного поля в шунтирующей части кольца при помощи четной части ряда Фурье по окружной координате. Путем решения соответствующей задачи теории термоупругости установлена связь усилия, вызванного нагревом шунтирующей части, с геометрическими характеристиками и физическими свойствами материала свариваемого кольца. Дана количественная оценка величины этого усилия при КСС кольца из стали 20 и его влияния на время, необходимое для выдержки стыка под давлением.

Усовершенствован инженерный метод, основанный на гипотезе ломаных сечений, позволяющий описывать напряженное состояние в зонах концентрации напряжений, обусловленной геометрией сварного соединения, и распространен на стыковые сварные соединения с симметричным усилением. Исследовано напряженное состояние сварного соединения, выполненного КСС, при удалении местного усиления вращающимися ножами и протяжкой стыка между неподвижными ножами, определены соответствующие коэффициенты концентрации напряжений при таких способах удаления местного усиления.

## Международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ»

13–15 июня 2016 г.

Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины

### Тематика конференции:

- ♦ электронно-лучевая сварка
- ♦ лазерная сварка
- ♦ гибридные процессы сварки
- ♦ сварка трением с перемешиванием
- ♦ контактно-стыковая сварка высокопрочных сталей
- ♦ сварка дугой, вращающейся в магнитном поле
- ♦ 3D адитивные технологии, базирующиеся на сварочных процессах

### Контрольные даты

- ♦ Подача заявок для участия и отправка доклада до 15.03.2016
- ♦ Рассылка программы конференции до 15.04.2016
- ♦ Оплата организационного взноса до 14.06.2016

### Организационный комитет:

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины  
03680, г. Киев, ул. Боженко 11, тел./факс: +38(044) 200-82-77  
E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua), [patonpublishinghouse@gmail.com](mailto:patonpublishinghouse@gmail.com)  
[www.pwi-scientists.com/rus/modernweld2016](http://www.pwi-scientists.com/rus/modernweld2016)  
[www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com)

## СВАРКА БОЙЛЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА CMT Twin\*

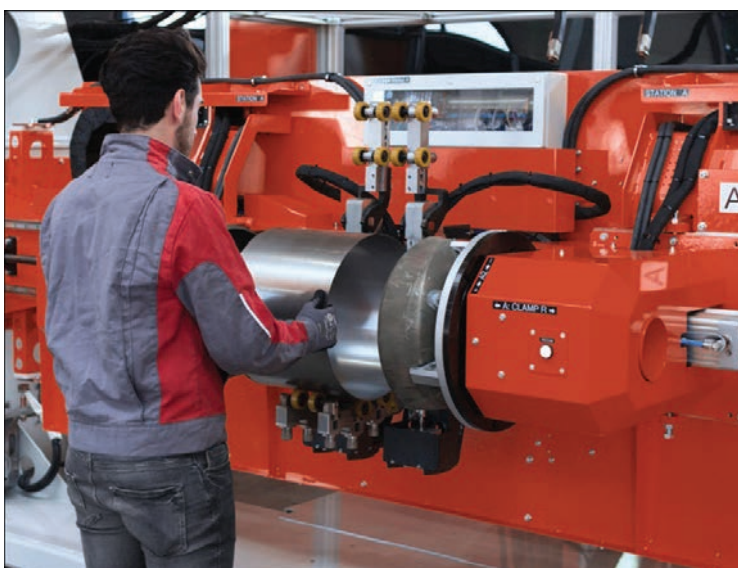
*Эффективность, качество и скорость — эти три слова лучше всего характеризуют систему CMT Twin. Данная система значительно сокращает издержки производственного процесса.*

Новая технология CMT Twin является действительно уникальной. Она представляет собой сочетание двух известных сварочных технологий от Fronius — TimeTwin и CMT. Система CMT Twin отличается не только высокой скоростью сварки, но и простотой управления процессами. Улучшенные характеристики проплавления обеспечивают повышение качества провара наряду с сохранением эффективности традиционного тандемного метода. Это достигается за счет того, что «ведущая» сварочная дуга, горящая на первом электроде, обеспечивает более глубокое проплавление основного материала, а «ведомая» дуга второго электрода используется для заполнения сварочной ванны. При этом обе дуги горят в общей сварочной ванне. Новая система синхронизированного запуска процесса сварки не имеет аналогов на рынке и обеспечивает стабильную сварочную дугу с самого начала процесса сварки. Процесс CMT Twin обеспечивает равномерное формирование шва и оптимальное проплавление, что гарантирует получение безупречного сварного шва. Превосходно согласованные графические характеристики и использование принципа «ведущего» и «ведомого» электрода упрощают процесс управления CMT Twin. После настройки «ведущего» электрода, «ведомый» электрод автоматически настраивается соответствующим образом. Лучше системы автоматической регулировки процесса сварки еще не было. Комбинированное применение технологий CMT и Pulse позволяет достичь наилучших результатов во всех областях применения.

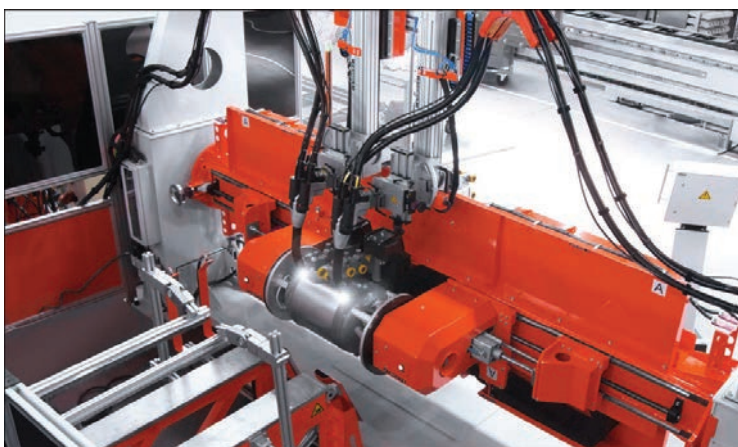
Технология CMT Twin открывает широчайшие возможности сварки в среде различных защитных газов и газовых смесях, в том числе, в среде широко распространенного газа CO<sub>2</sub>. Применение CMT Twin позволяет минимизировать сварочные брызги за счет безупречного отрыва капли в режиме CMT и увеличить скорость сварки и производительность наплавки более чем в два раза.

Дополнительно система CMT Twin обладает идеально согласованными специальными графическими характеристиками для каждой области применения. Для больших толщин рекомендуется использовать графическую характеристику «Heavy Duty». Режим CMT Twin Speed идеально подходит для сварки тонких и особо тонких листов на максимальной скорости. Применение технологии CMT, а точнее принципа механического отрыва капли, обеспечивает возможность наилучшего перекрытия зазоров, в том числе в системе CMT Twin. Независимая настройка процесса горения дуги на «ведущем» и «ведомом» электроде

\* Статья на правах рекламы.

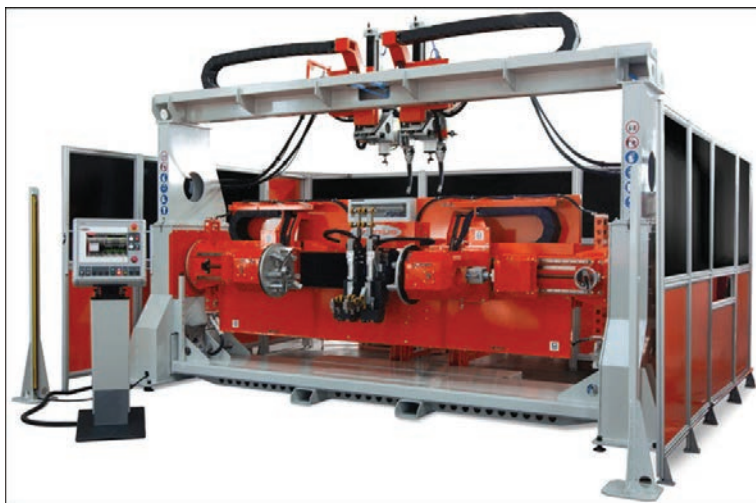


Торцы бойлеров вставляются в вакуумную присоску и пневматически спрессовываются с корпусом бойлера



Две сварочные горелки CMT Twin обеспечивают идеальные кольцевые швы и наилучшие результаты сварки





Система CMT Twin. Управление системой посредством HMI с графическим интерфейсом и сенсорным дисплеем

(скорость подачи проволоки, длина дуги, сила отрыва капли) делают процесс CMT Twin более гибким в применении и позволяют устанавливать различную мощность плавления в зависимости от области применения. Twin Compact Pro — новая, специально разработанная сварочная горелка для процесса CMT Twin, в которой сочетаются такие важнейшие характеристики как надежность, прочность, маневренность, высокоэффективная система охлаждения. Кроме того, для каждой области применения доступны комплекты сварочных горелок с оптимально подобранными параметрами.

Основа решения для сварки бойлеров — две системы CMT Twin, которые обеспечивают наилучшие результаты сварки за счет максимальной стабильности процесса. Благодаря особой конструкции системы, состоящей из двух отдельно настраиваемых источников тока и сварочной горелки с двумя изолированными друг от друга контактными наконечниками, CMT Twin обеспечивает впечатляющие показатели стабильности дуги и глубины проплавления, а также оптимальное замыкание сварного шва. В зависимости от допусков и формы деталей эта система может обеспечить скорость сварки до 3,5 м/мин. При этом производственный процесс разделен между двумя станциями. На первой станции в систему подаются все необходимые компоненты, которые соединяются между собой при помощи пневматического пресса, чтобы минимизировать объем и длительность подготовительных работ, например выполнения прихватки. На второй станции детали идеальным образом свариваются между собой при помощи CMT Twin и автоматически транспортируются далее. Благодаря такой механизации достигаются полностью воспроизводимые результаты сварки и как минимум в два раза повышается производительность по сравнению с ручными сварочными системами.

Еще одной отличительной особенностью является управление системой с помощью машинного интерфейса HMI. Графический интерфейс и сенсорный дисплей обеспечивают простую навигацию по меню и исключительное удобство использования. Сетевое подключение к системе управления дает возможность выявлять ошибки и при необходимости выполнять удаленное обслуживание системы. Меню системы доступно на нескольких языках.

Благодаря способности выполнять сварку на одной станции и одновременно устанавливать компоненты на другой эта система является образцом экономичности. Рабочий цикл, составляющий менее 45 секунд на деталь, позволяет выпускать до 80 бойлеров в час.

*Fronius International — австрийское предприятие с главным офисом в Петтенбахе и отделениями в Вельсе, Тальхайме, Штайнхаусе и Замтледте. Предприятие специализируется на системах для зарядки батарей, сварочном оборудовании и солнечной электронике. Всего штат компании насчитывает 3 385 сотрудников. Доля экспорта составляет 93 %, что достигается благодаря 21 дочерней компании, а также международным партнерам по сбыту и представителям Fronius более чем в 60 странах. Благодаря первоклассным товарам и услугам, а также 928 активным патентам, Fronius является лидером в области технологий на мировом рынке.*



SHIFTING THE LIMITS

ООО «ФРОНИУС УКРАИНА»  
07455, Киевская обл., Броварской р-н,  
с. Княжичи, ул. Славы, 24.  
Тел.: +38 044 277-21-41; факс: +38 044 277-21-44  
E-mail: sales.ukraine@fronius.com  
www.fronius.ua



## ОТКРЫТИЕ МЕМОРИАЛЬНОЙ ДОСКИ

25 января 2016 г. в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины состоялся митинг в честь открытия памятной доски, посвященной академику НАН Украины Игорю Константиновичу Походне. На церемонии присутствовали многочисленные сотрудники института, представители Президиума НАН Украины, родственники.

Выступивший на митинге заместитель директора института академик НАН Украины Л.М. Лобанов отметил значительную роль И.К. Походни в формировании массового производства сварочных материалов в СССР, создании промышленных центров по выпуску покрытых электродов, сварочных проволок в Украине. Был особо отмечен вклад академика И.К. Походни в разработку научных основ создания сварочных материалов на базе исследования физико-химических процессов в сварочной дуге, глубокого изучения вопросов снижения токсичности сварочных аэрозолей. Проведенные работы послужили основанием для организации массового производства электродов общего назначения, порошковых проволок для сварки в среде защитных газов, создания конструкции и технологии изготовления самозащитных порошковых проволок. Одновременно с научной работой в институте академик И.К. Походня активно трудился в Президиуме НАНУ, где занимал должности, главного ученого секретаря, вице-президента, а затем в течение более 27-ми лет возглавлял отделение Физико-технических проблем материаловедения. Это свидетельствует о большом доверии и высоком авторитете И.К. Походни в академической среде, у руководителей ведущих институтов академии.

Заместитель директора института академик НАН Украины К.А. Ющенко обратил внимание на постоянную работу И.К. Походни с кадрами. Выступающий привел эпизоды из личного общения с Игорем Константиновичем, напомнил о том большом внимании его к воспитанию молодых специалистов, формированию трудового коллектива, выбору перспективных направлений развития исследований и высокой требовательности к результатам работы сотрудников.

От имени сотрудников отдела, воспитанников академика И.К. Походни, с теплыми словами об академике выступил заведующий отделом физико-химических процессов в сварочной дуге д-р техн. наук В.В. Головкин. Он напомнил собравшимся о том тяжелом времени, в котором происходило становление характера Игоря Константи-



новича. Попав 14-летним подростком в горнило Второй мировой войны, он не только принял участие в боевых действиях, но и сумел получить образование и поступить в КПИ. Полученная в эти годы закалка позволила молодому специалисту с энтузиазмом включиться в работы по восстановлению Донбасса, по зову сердца прийти в академическую среду и на протяжении более 60-ти лет быть надежным соратником академика Б.Е. Патона в его деятельности как директора института и президента академии наук Украины. Опыт работы под руководством И.К. Походни служит примером в преодолении трудностей нашего времени, в дальнейшем развитии научных идей, сформулированных с его участием.

В заключение митинга выступила сестра И.К. Походни — член-корреспондент НАН Украины Надежда Константиновна Коваленко, которая вспомнила, каким вниманием и заботой о сотрудниках были наполнены рассказы ее брата в кругу семьи, поблагодарила собравшихся за то, что они ценят результаты его многолетнего труда и пришли почтить память Игоря Константиновича.



## ОТЧЕТНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОГРАММЕ «РЕСУРС»

22 января 2016 г. в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины состоялась отчетная конференция по итогам выполнения четвертого этапа целевой комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации конструкций, сооружений и машин» («Ресурс») в 2013–2015 гг. В работе конференции приняло участие более 100 ученых и специалистов из различных учреждений и организаций Украины.

Открыл конференцию академик НАН Украины Л.М. Лобанов. Он сообщил, что для выполнения этой программы, которая состояла из девяти разделов и содержала 126 проектов, было привлечено 25 институтов восьми отделений НАН Украины. Часть работ была посвящена внедрению результатов предыдущих этапов программы в соответствующие отрасли промышленности Украины и дальнейшему совершенствованию мониторинга технического состояния ответственных объектов.

Были заслушаны следующие обзорные доклады научных руководителей разделов программы «Ресурс» об основных полученных результатах:

– чл.-кор. НАН Украины В.В. Харченко, руководитель раздела «Разработка методологических

основ оценки и продления ресурса конструктивных элементов объектов повышенной опасности и авиакосмической техники»;

– академик НАН Украины З.Т. Назарчук, руководитель раздела «Разработка методов и новых технических средств неразрушающего контроля и диагностики состояния материалов и изделий длительной эксплуатации»;

– д-р техн. наук М.С. Хома, заместитель руководителя раздела «Разработка методов защиты от коррозии элементов конструкций объектов длительной эксплуатации»;

– чл.-кор. НАН Украины В.Н. Воеводин, руководитель раздела «Разработка эффективных методов оценки и удлинения ресурса объектов атомной энергетики»;

– академик НАН Украины А.А. Долинский, руководитель раздела «Повышение надежности и продление ресурса энергетического оборудования и систем»;

– чл.-кор. НАН Украины А.Я. Красовский, руководитель раздела «Создание систем мониторинга технического состояния трубопроводов и объектов газо- и нефтеперерабатывающей промышленности»;



Выступление академика В.В. Панасюка



– академик НАН Украины Л.М. Лобанов, руководитель раздела «Повышение надежности и продление ресурса мостов, строительных, промышленных и транспортных конструкций»;

– академик НАН Украины К.А. Ющенко, руководитель раздела «Разработка технологий ремонта и восстановления элементов конструкций объектов повышенной опасности с целью продления срока их эксплуатации»;

– академик НАН Украины В.В. Панасюк, руководитель раздела «Подготовка и печать нормативных документов и научно-технических пособий по вопросам оценки ресурса объектов длительной эксплуатации».

В процессе выполнения проектов программы «Ресурс» получены важные научные, научно-технические и практические результаты. Представим некоторые из них.

Для отрасли железнодорожного транспорта в пределах комплексного проекта, который выполняется Институтом черной металлургии, Физико-технологическим институтом металлов и сплавов и Физико-механическим институтом, разработана новая износостойкая сталь для железнодорожных колес и методы определения их эксплуатационного ресурса при наличии повреждаемой поверхности катания дефектами типа выщербины. Создан лабораторный металлургический комплекс, который позволил изготовить опытные образцы, постоянные по химическому составу, неметаллическим включениям, вредным примесям. Параметры горячего деформирования отвечают требованиям промышленного производства колес и отличаются от базовой стали уменьшенным содержанием углерода и применением технологий дисперсионного нитридного и твердорастворимого упрочнения марганцем и кремнием. Прогнозируется существенное повышение эксплуатационного ресурса и надежности колес.

Специалистами Физико-технологического института металлов и сплавов доказано, что повышение ресурса сильно-токового скользящего контакта базируется на применении вставок на основе меди с легирующими добавками железа, хрома и углерода, которые обеспечивают повышенные трибологические свойства при меньшем износе контактного провода. Создано технологическое оборудование, изготовлены опытные образцы вставок и проведены исследования их свойств соответственно потребностей Укрзализныци. Совместно с предприятием, которое изготавливают контактные пластины пантографов, разработаны технологические рекомендации для промышленного освоения производства предложенных контактных деталей, которые используются на железнодорожном транспорте.

Институтом проблем материаловедения разработаны технологии изготовления элементов фрикционных пар из порошковых композиционных материалов с повышенным эксплуатационным ресурсом для тормозных устройств подвижного состава железнодорожного транспорта. Выполнен комплекс лабораторных и стендовых испытаний физико-механических и триботехнических характеристик полученных материалов системы металл–стекло и опытно-промышленная апробация разработанной технологии в заводских условиях, начата подготовка к их серийному производству.

Создана система управления процессом контактной сварки оплавлением рельсов в стационарных и полевых условиях, что обеспечивает повышение эксплуатационного ресурса и надежности железнодорожных путей. Она позволяет обнаруживать отклонение параметров и предупреждать их выход за нормативные допуски, что стабилизирует процесс сварки и улучшает качество и долговечность сварных соединений. Система прошла испытание в промышленных условиях и внедряется на рельсосварочных предприятиях Укрзализныци.

Создан комплекс технических средств для автоматизированной ультразвуковой дефектоскопии железнодорожных рельсов с использованием современных информационных технологий. Разработано математическое обеспечение микропроцессорных узлов и средств интерактивного взаимодействия оператора с органами управления ультразвукового рельсового дефектоскопа. Проведено комплексное исследование разработанных механических и электронных узлов дефектоскопа на образцах рельсов с разными типами дефектов. Создан опытный образец автоматизированного ультразвукового дефектоскопа для применения в путевом хозяйстве Украины при выявлении дефектов в рельсах железнодорожного пути.

Для отрасли трубопроводного транспорта исследованы причины разрушения кольцевых сварных соединений магистральных газонефтепроводов. Установлено, что они обусловлены наличием технологических дефектов, главным образом коррозионных, из-за низкого качества сборочно-сварочных и эксплуатационных работ. Уровень механических свойств металла сварных соединений, в том числе после длительной эксплуатации газонефтепроводов, является достаточным и не может рассматриваться в качестве причин их разрушения. Предоставлены рекомендации относительно устранения причин возникновения дефектов и предупреждения разрушения кольцевых соединений во время эксплуатации.

Создано первое отечественное оборудование низкочастотного ультразвукового контроля со-



стояния технологических трубопроводов и других протяженных объектов без сканирования их поверхностей. Его существенным преимуществом является дальное действие и эффективность диагностики протяженных объектов в местах, где другие методы являются непригодными. Например, в местах подземного пересечения трубопроводами автодорог и железнодорожных путей, прохождения трубопроводов через реки и другие препятствия. Осуществлено испытание и проведена адаптация разработанной аппаратуры к применению в производственных условиях. Установлено, что она обеспечивает повышенную чувствительность к коррозионно-эрозионным повреждениям и по точности определения расстояния к дефектам отвечает лучшим зарубежным аналогам.

Институтом электросварки разработана система непрерывного акустико-эмиссионного мониторинга технического состояния высокотемпературных компонентов энергетического оборудования. Она позволяет на основе данных акустической эмиссии в реальных условиях эксплуатации конструктивных элементов определить предразрушительную нагрузку материала в любой момент времени независимо от срока наработки и колебаний температуры. Система внедрена в промышленную эксплуатацию для мониторинга паропроводов горячего перегрева пара энергоблока № 1 Киевской ТЭЦ-6. Также проводятся работы относительно ее приложения для непрерывного мониторинга барабана котла на Киевской ТЭЦ-5.

Создан комплекс технических мероприятий для высокочастотной и оптико-акустической диагностики композитных элементов конструкций авиакосмической техники. Комплекс включает сверхвысокочастотный рефлектометр миллиметрового диапазона длин волн, оптико-акустический интерференционный коррелятор и программное обеспечение для выявления в реальном времени расслоений и других внутренних дефектов в композитах. Проведено исследова-

ние выявления дефектов в композитных образцах многослойной и ячеистой структуры. Запланировано испытание разработанного комплекса технических средств сверхвысокочастотной и оптико-акустической диагностики в производственных условиях на ГП «Антонов» и КБ «Южное».

Разработана технология диагностики методом электронной широкографии элементов авиационных конструкций из металлических и композиционных материалов. Ее эффективность подтверждена исследованиями как на тестовых образцах, так и на натурных элементах обшивки фюзеляжа крыла самолета. Она может использоваться при производстве конструкций, а также при их эксплуатации и ремонте. В настоящее время технология внедряется для диагностики компонентов авиационного оборудования на ГП «Антонов».

Разработана гибридная технология, которая совмещает электронно-лучевую сварку и сварку трением с перемешиванием для возобновления ресурса конструкций авиационной и космической техники из алюминиевых и магниевых сплавов. Разработан типоразмерный ряд инструментов и методология предварительной обработки трением с перемешиванием поверхностных слоев, что позволяет получить мелкозернистую структуру сплавов и значительно повысить прочность соединений после электронно-лучевой сварки. Гибридная технология внедрена на предприятии «Мотор-Січ».

Суммарный ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов проектов программы «Ресурс» составляет десятки миллионов гривен в год. В целом по проектам программы получено много других полезных результатов. Эти результаты являются актуальными и дают основание считать целесообразным продолжение работы программы на следующем этапе. С материалами выполнения программы «Ресурс» можно ознакомиться в открытом доступе по ссылке: <http://patonpublishinghouse.com/compilations/resurs2015.pdf>.

А.Т. Зельниченко,  
канд. физ.-мат. наук

## ПАМЯТИ В.Ф. ХОРУНОВА



26 января 2016 г. на 79-м году жизни после тяжелой и продолжительной болезни ушел из жизни кадровый сотрудник ИЭС им. Е.О. Патона, член-корреспондент НАН Украины, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины лауреат Государственной премии СССР и

премии Е.О. Патона Виктор Федорович Хорунوف.

После окончания в 1959 г. Киевского политехнического института он поступил на работу в Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. Прошел путь от инженера до заведующего отделом физико-химических процессов пайки.

Начало его творческой деятельности связано с изучением особенностей структурных и фазовых превращений в чугунах с различным содержанием элементов-графитизаторов, кристаллизующихся в условиях высоких скоростей охлаждения, которые характерны для сварочных процессов. На этой основе были разработаны составы порошковых проволок и создан способ механизированной дуговой сварки чугуна.

Основная научная деятельность В.Ф. Хорунова посвящена исследованию процессов высокотемпературной и низкотемпературной пайки, созданию научной школы в этой области. Исследования охватывают практически все конструкционные материалы, используемые в промышленности. Под его руководством разработаны научные основы, припой и технология вакуумной пайки тонкостенных конструкций из нержавеющей сталей различных классов, которые нашли широкое применение в промышленности. За работу в области ракетостроения ему присуждена Государственная премия СССР в области науки и техники.

Важным аспектом научной деятельности В.Ф. Хорунова является разработка научных основ, технологических процессов и припоев для пайки жаропрочных никелевых сплавов, интерметаллидных и дисперсно-упрочненных сплавов, углеродных материалов, сплавов на основе титана и алюминия. Впервые изучены фазовый состав и интервалы плавления сплавов систем Ni–Cr–Zr, Ti–Zr–Mn, Ti–Zr–Fe, Ti–Zr–Co в широких пределах концентраций, построены поверхности ликвидуса названных систем. На основе фундаментальных исследований системы  $KF-AlF_3-K_3SiF_6$  создан оригинальный реактивный флюс для пайки алюминия, который позволяет прово-

дить процесс пайки без введения припоя. Для низкотемпературной флюсовой пайки алюминия впервые синтезирован новый класс комплексных тетрафторборатов.

Под руководством В.Ф. Хорунова выполнен ряд специальных проектов. Так, был подготовлен и успешно осуществлен эксперимент по пайке на околоземной орбите. В рамках международного проекта «Токомак» разработаны припои и технология пайки разнородных соединений дивертора установки термоядерного синтеза и исследована работоспособность разнородных паяных соединений в условиях жесткой термической нагрузки и нейтронного облучения.

В.Ф. Хорунов был руководителем (с украинской стороны) нескольких международных проектов — «Коперникус» (ЕС) и двух проектов под эгидой Министерства энергетики США: с Ливерморской национальной лабораторией и с Национальной лабораторией «Сандия».

В последние годы В.Ф. Хорунов уделял большое внимание новому направлению исследований — дуговой пайке различных материалов. Создана, в частности, технология дуговой пайки оцинкованной стали, которая обеспечивает сохранение покрытия и не требует дополнительной обработки соединения после пайки.

Созданы материалы и технология пайки долот для наземного и подземного бурения, что позволило в несколько раз увеличить величину проходки. Созданные долота прошли широкую проверку в реальных условиях эксплуатации.

В.Ф. Хорунов является автором более 380 печатных работ, в том числе трех монографий и 65 авторских свидетельств и патентов. Под его руководством защищено 11 кандидатских и 1 докторская диссертации, в том числе 3 российскими и одна китайскими специалистами. Он являлся членом ученого совета Института электросварки им. Е.О. Патона, редакционных коллегий журналов «Автоматическая сварка» и «Адгезия расплавов и пайка материалов», двух спецсоветов по защита диссертаций. На протяжении ряда лет был председателем I комиссии Национального комитета СССР Международного института сварки. Многократно выступал с лекциями в США и Китае.

Сотрудники Института, друзья и коллеги с глубокой скорбью переживают эту потерю, выражают искреннее соболезнование родным и близким Виктора Федоровича, всем, кто знал, любил и уважал его. Светлая память навсегда останется в их сердцах.

Редколлегия и редакция журнала  
«Автоматическая сварка»

## ПОДПИСКА 2016 — на журнал «АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
720 грн.	1440 грн.	5400 руб.	10800 руб.	90 дол. США	180 дол. США

В стоимость подписки включена стоимость доставки заказной бандеролью.

Подписку на журнал «Автоматическая сварка» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств «Пресса», «Идея», «Прессцентр», «Информ-наука», «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).



Подписка на электронную версию журнала «Автоматическая сварка»  
на сайте: <http://www.patonpublishinghouse.com>

В открытом доступе выпуски журнала с 2009 по 2014 гг. в формате \* pdf.

Журнал «Автоматическая сварка» реферируется и индексируется в базах данных «Джерело» (Украина), ВИНТИ РЖ «Сварка» (Россия), INSPEC, «Welding Abstracts», ProQuest (Великобритания), EBSCO Research Database, CSA Materials Research Database with METADEX (США), Questel Orbit Inc. Weldasearch Select (Франция); представлен в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), «Google Scholar» (США); реферируется в журналах «Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach» (Польша) и «Rivista Italiana della Saldatura» (Италия); освещается в обзорах японских журналов «Journal of Light Metal Welding», «Journal of the Japan Welding Society», «Quarterly Journal of the Japan Welding Society», «Journal of Japan Institute of Metals», «Welding Technology».

## РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

#### Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- Первая страница обложки (190×190 мм) 700\$
  - Вторая (550\$), третья (500\$) и четвертая (600\$) страницы обложки (200×290 мм)
  - Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200×290 мм) 400\$
  - Вклейка А4 (200×290 мм) 340\$
  - Разворот А3 (400×290 мм) 500\$
  - 0,5 А4 (185×130 мм) 170\$
- #### Технические требования к рекламным материалам
- Размер журнала после обрезки 200×290 мм

- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5 мм с целью избежания потери части информации

#### Все файлы в формате IBM PC

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

#### Стоимость рекламы и оплата

- Цена договорная
- По вопросам стоимости размещения рекламы, свободной площади и сроков публикации просьба обращаться в редакцию

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу
- Для постоянных партнеров предусмотрена система скидок
- Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади
- Публикуется только профильная реклама (сварка и родственные технологии)
- Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

#### Контакты:

тел./факс: (38044) 200-82-77; 200-54-84  
E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
[www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com)

© Автоматическая сварка, 2016

Подписано к печати 04.02.2016. Формат 60×84/8. Офсетная печать.  
Усл. печ. л. 9,09. Усл.-отт. 10,09. Уч.-изд. л. 10,22.  
Печать ООО «Фирма «Эссе». Тираж 820 экз.  
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.