

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

**Главный редактор  
Б. Е. Патон**

Ю. С. Борисов, Г. М. Григоренко,  
А. Т. Зельниченко, В. В. Кныш,  
И. В. Кривцун,  
С. И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.),  
Ю. Н. Ланкин,  
В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),  
Л. М. Лобанов, А. А. Мазур,  
О. К. Назаренко, В. Д. Позняков,  
И. К. Походня, И. А. Рябцев,  
Б. В. Хитровская (отв. секр.),  
В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко  
(в редакционную коллегию  
входят ученые ИЭС им. Е. О. Патона)

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

**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 Самари, Ариэль, Израиль  
**В. И. Лысак**  
Волгоградский гос. техн. ун-т, РФ  
**У. Райсген**  
Ин-т сварки и соединений, Аахен, Германия  
**Б. Е. Патон**  
ИЭС им. Е. О. Патона, Киев, Украина  
**Я. Пилярчик**  
Ин-т сварки, Гливице, Польша  
**О. И. Стеклов**  
РНТСО, Москва, РФ  
**Г. А. Турчин**  
С.-Петербургский гос. политехн. ун-т, РФ  
**В. Г. Фартушный**  
Общество сварщиков Украины, Киев

**Учредители**

Национальная академия наук Украины,  
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ,  
МА «Сварка» (издатель)

Издается ежемесячно

**Адрес редакции**

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ  
03680, Украина, Киев-150,  
ул. Боженко, 11  
Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277  
Факс: (38044) 200 5484, 200 8277  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
www.patonpublishinghouse.com

**Редактор**

Т. В. Юштина  
Электронная верстка  
И. Р. Наумова, А. И. Сулима, Д. И. Середа

Свидетельство о государственной  
регистрации КВ 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.

**СОДЕРЖАНИЕ**

Кафедре сварочного производства Национального университета кораблестроения им. Адмирала Макарова 55 лет .....	3
<i>Квасницкий В. В., Квасницкий В. Ф., Маркашова Л. И., Матвиенко М. В.</i> Влияние напряженно-деформированного состояния на структуру и свойства соединений при диффузионной сварке разнородных металлов .....	10
<i>Квасницкий В. Ф., Квасницкий В. В., Черенда Н. Н., Коваль Н. Н., Левченко И. Л.</i> Закономерности создания модифицированных прослоек при использовании высококонцентрированных потоков энергии .....	17
<i>Колесар И. А., Ермолаев Г. В.</i> Напряженно-деформированное состояние при силовом и температурном нагружении узлов из разнородных сталей с мягкой прослойкой .....	23
<i>Ермолаев Г. В., Мартыненко В. А., Марунич И. В.</i> Влияние размеров выпуклости шва на напряженное состояние стыкового соединения при растяжении .....	28
<i>Лебедев В. А., Драган С. В., Голобородько Ж. Г., Симутенков И. В., Ярос Ю. А.</i> Технологические характеристики автоматической наплавки под флюсом с высокочастотными колебаниями торца электрода .....	35
<i>Дубовой А. Н., Карпенченко А. А., Бобров М. Н.</i> Повышение эксплуатационных свойств электродуговых и плазменных покрытий электроимпульсным воздействием на двухфазный высокотемпературный поток .....	39
<i>Верещаго Е. Н., Костюченко В. И.</i> Неустойчивость режима в цепи с емкостью и электрической дугой, питаемой от источника постоянного тока .....	44

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ**

<i>Патон Б. Е., Савицкий М. М., Савицкий А. М., Мазур А. А.</i> Эффективность морской транспортировки природного газа при использовании сварных баллонов высокого давления .....	49
<i>Перемитько В. В.</i> Износостойкая дуговая наплавка по слою легирующей шихты .....	56

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

Диссертации на соискание ученой степени .....	60
---	----

**ХРОНИКА**

Международная конференция «Титан-2014 в СНГ» .....	62
19-я сессия Научного совета по новым материалам при Комитете по естественным наукам Международной ассоциации академий наук .....	63
Международная конференция «Сварочные материалы» .....	66
Международная выставка «Сварка 2014» .....	67
Семинар «Автоматизация сварочных процессов» .....	69
Г. К. Харченко — 80 .....	72

## EDITORIAL BOARD

**Editor-in-Chief**  
**B. E. Paton**

Yu. S. Borisov, G. M. Grigorenko,  
A. T. Zelnichenko (exec. director),  
V. V. Knysh, I. V. Krivtsun,  
S. I. Kuchuk-Yatsenko (vice-chief ed.),  
Yu. N. Lankin,  
V. N. Lipodaev (vice-chief ed.),  
L. M. Lobanov, A. A. Mazur,  
O. K. Nazarenko, I. K. Pokhodnya,  
V. D. Poznyakov, I. A. Ryabtsev,  
B. V. Khitrovskaya (exec. secr.),  
V. F. Khorunov, K. A. Yushchenko  
(*Editorial Board Includes PWI Scientists*)

## INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL

**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

**B.E. Paton**

PWI, Kyiv, Ukraine

**Ya. Pilarczyk**

Welding Institute, Gliwice, Poland

**U. Reisgen**

Welding and Joining Institute, Aachen, Germany

**O.I. Steklov**

Welding Society, Moscow, Russia

**G.A. Turichin**

St. Petersburg State Polytechn. Univ., Russia

**V.G. Fartushnyi**

Welding Society of Ukraine, Kyiv

## Founders

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

Published monthly

## Address of Editorial Board:

11 Bozhenko 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

## Editor

T. V. Yushtina  
Electron galley

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

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

## CONTENTS

Chair of Welding Fabrication of Admiral Makarov National University of Shipbuilding is 55 .....	3
<i>Kvasnitskii V. V., Kvasnitskii V. F., Markashova L. I., Matvienko M. V.</i> Influence of stress-strain state on the structure and properties of joints in diffusion welding of dissimilar metals .....	10
<i>Kvasnitskii V. F., Kvasnitskii V. V., Cherenda N. N., Koval N. N., Levchenko I. L.</i> Regularities of producing modified interlayers with application of high-energy density flows .....	17
<i>Kolesar I. A., Ermolaev G. V.</i> Stress-strain state at force and temperature loading of components from dissimilar steels with a soft interlayer .....	23
<i>Ermolaev G. V., Martynenko V. A., Marunich I. V.</i> Influence of dimensions of weld convexity on stressed state of a butt joint in tension .....	28
<i>Lebedev V. A., Dragan S. V., Goloborodko Zh. G., Simutenkov I. V., Yaros Yu. A.</i> Technological characteristics of automatic submerged-arc surfacing with high-frequency oscillations of electrode tip .....	35
<i>Dubovoj A. N., Karpenchenko A. A., Bobrov M. N.</i> Improvement of electric-arc and plasma coating performance by electric pulse impact on two-phase high-temperature flow .....	39
<i>Vereshchago E. N., Kostyuchenko V. I.</i> Instability of the mode in the circuit with a capacitance and electric arc powered by d.c. source .....	44

## INDUSTRIAL

<i>Paton B. E., Savitskii M. M., Savitskii A. M., Mazur A. A.</i> Effectiveness of sea transportation of natural gas at application of welded high-pressure cylinders .....	49
<i>Peremitko V. V.</i> Wear-resistant arc surfacing over a layer of alloying charge .....	56

## BRIEF INFORMATION

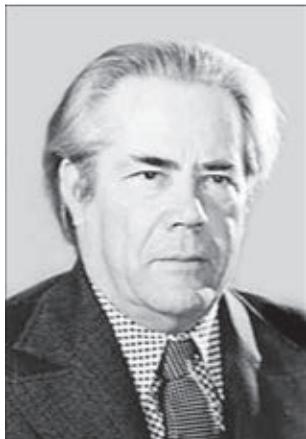
Dissertations for a scientific degree .....	60
---	----

## NEWS

International Conference «Titan-2014 in CIS» .....	62
19th Session of Scientific Council on New Materials at the Committee on Natural Sciences of International Association of Academies of Sciences .....	63
International Conference «Welding Materials» .....	66
International Exhibition «Welding 2014» .....	67
Seminar «Automation of Welding Processes» .....	69
G. K. Kharchenko is 80 .....	72

«Automaticheskaya Svarka» journal abstracted & indexed in Ukrainian refereed journal «Source», RJ VINITI «Welding» (Russia), «Welding Abstracts», ProQuest (UK), EBSCO Research Database, CSA Materials Research Database with METADEX (USA), Questel Orbit Inc. Weldasearch Select (France); Presented in Russian Science Citation Index & «Google Scholar»; Abstracted in «Welding Institute Bulletin» (Poland) & «Rivista Italiana della Saldatura» (Italy); Covered in the review of the Japanese journals «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».

# КАФЕДРЕ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ им. АДМИРАЛА МАКАРОВА 55 ЛЕТ



А. И. Сафонов

Кафедра сварочного производства организована в 1959 г. Первым заведующим кафедрой был доцент А. И. Сафонов, с 1975 г. — доцент И. И. Джевага, а с 1980 г. кафедрой заведует д-р техн. наук, проф. В. Ф. Квасницкий.

Развитие кафедры можно разделить на несколько этапов:

- организация и налаживание учебного процесса (1959–1964);
- научное становление и формирование кадров научного коллектива (1965–1974);
- всестороннее развитие, реализация потенциала коллектива кафедры и его признание научной общественностью (1975–1990);
- совершенствование работы в условиях само-



И. И. Джевага

стоятельности Украины, широкое международное сотрудничество и европейская интеграция в системе образования, подготовка научной смены (с 1991 г. по настоящее время).

Первые годы для кафедры были особенно трудными: отсутствие преподавательского коллектива, лабораторий, учебно-вспомогательного персонала, оборудования, приборов. Все это создавало большие сложности в организации учебного процесса и научной работы. Благодаря активности доцентов А. И. Сафонова, И. И. Джеваги и М. Л. Фукельмана с самого начала создания кафедры была налажена тесная связь с производством, позволившая совместно с местными предприятиями успешно разрабатывать и внедрять новые технологии. Этому же способствовали и объективные условия на юге Украины, в частности, в Николаеве. В октябре 1953 г. был введен в эксплуатацию Южный турбинный завод (ЮТЗ), в 1961 г. организовано СПБ «Машпроект» для создания судовых газотурбинных двигателей, заводы «Океан», им. 61 коммунара и Черноморский судостроительный наращивали мощности. В судостроении применялись традиционные конструкционные материалы и актуальным было внедрение высокопроизводительных способов сварки. В газотурбостроении применялись новые конструкционные материалы, поэтому возникало множество актуальных и сложных задач, в решении которых принимали участие преподаватели кафедры. Каждый студент, начиная с третьего курса, имел свою научную тему, которую выполнял совместно с преподавателем и заводскими работниками. В дальнейшем эти темы становились темами кандидатских диссертаций выпускников кафедры. Научная работа студентов лежала в основе их подготовки, что сейчас задекларировано в болонской системе.

К концу 1974 г. на кафедре был сформирован научный коллектив, который обеспечивал высокий уровень как учебной, так и научной работы. К этому времени защитили кандидатские диссертации В. Ф. Квасницкий (1967), Г. В. Ермолаев, А. И. Дремлюга, Ю. М. Лебедев (1970), А. И. Сафонов (1973). Кафедра поддерживала связь с вузами и научными организациями бывшего СССР: МВТУ им. Н. Э. Баумана, ИЭС им. Е. О. Патона, Институтом проблем материаловедения и др. Тесная связь установилась с Институтом сварки Словении (г. Любляна). Над докторской диссертацией работал доцент И. И. Джева-



Заседание ГЭК (1983). Первый слева — председатель комиссии академик АН УССР Б. А. Мовчан

га, участник Великой Отечественной войны. Он помогал всем молодым преподавателям в работе над кандидатскими диссертациями, продолжал работу на Черноморском судостроительном заводе.

В 1974/75 учебном году на сварочной специальности обучались четыре группы (100 чел.) студентов дневного, две группы (50 чел.) вечернего отделений в Николаеве и две группы (50 чел.) вечернего отделения в Херсоне. Кафедра ежегодно имела один из наиболее крупных в институте объемов хозяйственных работ. В этот период над диссертациями работали около 10 аспирантов и соискателей.

С 1975 по 1980 гг. кафедрой заведовал доцент И. И. Джевага — ведущий специалист в стране по сварке, наплавке, пайке меди и ее сплавов со сталями, по состоянию здоровья не завершивший работу над докторской диссертацией.

В последующие годы усилиями кафедры удалось расширить и укрепить ее материальную базу и к 1985 г. увеличить инженерные и лабораторные площади с 350 до 1000 м<sup>2</sup>. Этому способствовало то, что вся научная работа кафедры велась по важнейшим темам государственных программ.

Несколько научных направлений кафедры сформировались с момента ее организации и начинались со студенческих работ. Направление контроля качества начало развиваться с внедрения ультразвукового контроля сварных швов судокорпусных конструкций. В дальнейшем это направление расширилось разработкой методик и аппаратуры для контроля диффузионно-сварных и паяных соединений, в том числе из разнородных материалов. Здесь следует отметить большой вклад доцента В. П. Савченко, который создал лабораторию ультразвукового контроля, что предопределило появление новой специализации при подготовке студентов — неразрушающий метод контроля качества сварных соединений.

Ориентированным на судостроение было научное направление по точности изготовления сварных корпусных конструкций, по которому работал и защитил кандидатскую диссертацию Г. В. Ермолаев.

Направление сварки и родственных процессов в газотурбостроении начиналось в 1960 г. с работ по диффузионной сварке жаропрочных сплавов при содействии д-ра техн. наук, проф. Н. Ф. Казакова — автора и страстного пропагандиста способа диффузионной сварки в вакууме, впоследствии лауреата Ленинской премии, ученого, под руководством которого выполнено и защищено более сотни кандидатских и докторских диссертаций с широким промышленным внедрением.

Судовое газотурбостроение бурно развивалось. Ежегодно на предприятия поступало по несколько марок новых жаропрочных металлических и неметаллических материалов. Соединение этих материалов как в однородном, так и в разнородном сочетаниях было всегда проблематичным и требовало разработки новых технологий сварки и родственных процессов. Нерешенными оставались вопросы контроля качества сварки и пайки, а также собственных напряжений при соединении разнородных материалов и особенно при работе узлов в условиях термоциклирования. Успешное решение указанных проблем объединило усилия специалистов всех направлений. Постепенно работы вышли на всесоюзный, а затем и международный уровень, а также за рамки судостроения.

В 1979 г. научно-технический совет НПО «Энергия» под председательством заместителя руководителя организации, лауреата Ленинской премии, Героя Социалистического Труда, д-ра техн. наук, проф. М. В. Мельникова, заслушав доклад доцента В. Ф. Квасницкого о работах кафедры, принимает



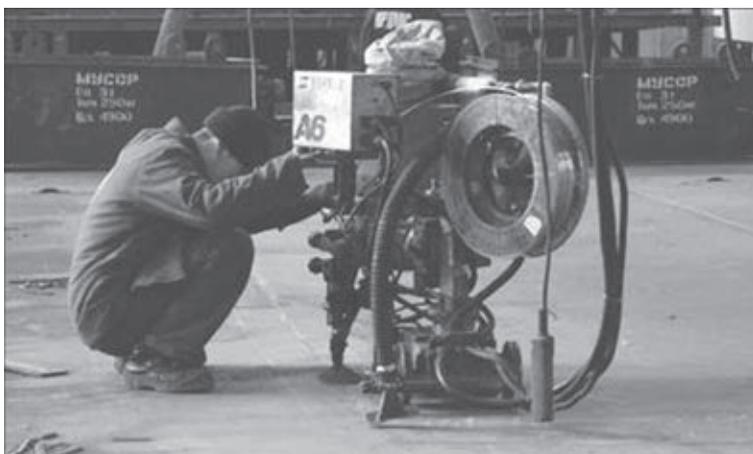
30 лет коллективу кафедры (1984). Слева направо: Ю. И. Русанов, Ю. М. Лебедев, Б. В. Бугаенко, А. И. Сафонов, ректор МВТУ им. Н. Э. Баумана, академик Г. А. Николаев (сзади А. И. Дремлюга), В. Ф. Квасницкий, Г. В. Ермолаев, В. П. Савченко, В. И. Лукин

решение о финансировании работ кафедры по исследованию и изготовлению уникального сверхвысоковакуумного технологического оборудования, а также производству промышленных МГД устройств. Началась напряженная работа по созданию уникального сверхвысоковакуумного комплекса для сварки, пайки, электронно-лучевого и ионно-плазменного напыления, вошедшего в дальнейшем в Госреестр научных объектов, которые составляют национальное достояние Украины. Для организации производства штатных изделий потребовалось, кроме создания оборудования, решить сложнейшие проблемы остаточных напряжений и де-

формаций в узлах из разнородных материалов, включающих тонкостенные элементы конструкции, а также контроля качества соединений. В 1981 г. была разработана и введена в эксплуатацию не имевшая аналогов сверхвысоковакуумная установка ВВУ-1Д для диффузионной сварки, пайки и ионно-плазменного напыления (объем рабочей камеры около 4 м<sup>3</sup>, вакуум не ниже 10...5 Па), оснащенная управляемым извне манипулятором. В 1983 г. была разработана и создана сверхвысоковакуумная установка для электронно-лучевого напыления. Все вопросы принципиального устройства оборудования решались совместно доцентами В. Ф. Квасницким и Г. В. Ермолаевым, а функции главного строителя выполнял Л. М. Петренко, при активном участии которого была также создана и внедрена на ЮТЗ «Заря» первая технологическая вакуумная установка УД-СВ-ДТ (для сварки деталей турбин) еще в начале 1960-х годов. Работы по сварке и пайке материалов и узлов газовых турбин, МГД устройств входили в план фундаментальных НИР и государственные программы, выполнявшиеся по постановлению Правительства СССР.



Сверхвысоковакуумная установка ВВУ-1Д. Молодые ученые за исследованиями (2012)



Студент во время прохождения первой технологической практики на заводе «Океан»

В 1985 г. при активной поддержке ректора проф. М. Н. Александрова, директора ЦНИИ КМ «Прометей» академика АН СССР И. В. Горынина и его заместителя по научной работе д-ра техн. наук, проф. В. А. Игнатова в НКИ была создана отраслевая лаборатория Минсудпрома (с передачей штатов и лимитов по труду из ЦНИИ КМ «Прометей») по пайке и сварке давлением материалов в вакууме. Научным руководителем назначен В.Ф. Квасницкий, заведующим лабораторией — Л. М. Петренко.

В конце 1970-х годов на кафедре начало активно развиваться научное направление по автоматизации сварочного производства в судостроении, в том числе применительно к конструкциям из легких алюминиевых сплавов. В 1985 г. была создана отраслевая лаборатория автоматизации и механизации сборочно-сварочных процессов в судостроении. Научным руководителем направления и лаборатории стал канд. техн. наук, доцент А. И. Дремлюга, который, к сожалению, ушел из жизни в расцвете творческих сил.

По автоматизации сварочных процессов защитили кандидатские диссертации С. В. Драган (1981), В. Н. Христенко (1984), А. Я. Каплун (1985). Коллективом разработаны основы сварки стыковых и тавровых соединений с одновременной компенсацией сварочных деформаций путем прокатки соединений роликами. Для сварки с прокаткой были разработаны и изготовлены совместно с НФ ЦНИИ ТС автоматы «Стык» и «Тавр». Технология сварки с прокаткой внедрена на судостроительных предприятиях «Янтарь», «Море», «Балтия» и др.

Кафедра комплектовалась своими выпускниками, проявившими склонность к научной работе. Диссертационные работы выполняли в лабораториях кафедры, чему способствовала солидная материальная база и профессионализм преподавателей.

---

С 1974 г. на кафедре развивается научное направление по пайке конструкционных неметаллических материалов с металлами. Были заключены договоры с КБ «Салют» (г. Москва), Институтом ядерной энергетики АН БССР (г. Минск). Начинается плодотворное сотрудничество с Институтом проблем материаловедения АН УССР (ИПМ). Большой вклад в сотрудничество с кафедрой сварочного производства внесли академики АН УССР В. И. Трефилов и Ю. В. Найдич. В 1975 г. кафедра сварочного производства впервые в Николаеве провела Всесоюзную научно-техническую конференцию «Адгезия расплавов и пайка материалов», в которой приняло участие более 350 ученых. По результатам конференции были изданы научные труды и тезисы, принято решение о выпуске журнала «Адгезия металлов и пайка материалов». В это же время начинается активное сотрудничество по внедрению результатов исследований в области соединения неметаллических материалов с металлами с НИИ «Графит» (г. Москва), КБ «Винт» (г. Москва), НПО «Энергия». Разработаны технологии соединения конструкционных материалов на основе графита, керамических материалов со сплавами титана, электротехнической медью, нержавеющей стали. Разработана принципиально новая технология изготовления электротехнических щеток для электрических машин. В 1979 г. ассистент кафедры В. М. Емельянов совместно с сотрудниками ИПМ за цикл работ по пайке графита с металлами стал лауреатом премии АН УССР для молодых ученых.

Наиболее интенсивно велись работы по сварке и родственным технологиям в судостроении. Кандидатские диссертации защитили Б. В. Бугаенко (1975), В. П. Савченко (1976), В. М. Емельянов (1980), а по пайке жаропрочных материалов — Н. В. Алтухов (1985), С. Г. Кулик (1986), С. М. Самохин (1987).

Сваркой закаливаемых сталей занимались доценты Ю. М. Лебедев и Л. П. Кравченко. В 1976 г. Л. П. Кравченко защитил кандидатскую диссертацию. Были созданы оригинальные лабораторные установки для исследования структурных и фазовых превращений в металлах. По результатам исследований построены диаграммы термокинетического распада аустенита для сталей различных структурных классов.

Все работы на кафедре выполнялись в тесном сотрудничестве с ЮТЗ «Заря», СПБ «Машпроект» (ныне ГП НПКГ «Заря-Машпроект»), Николаевским филиалом ЦНИИ ТС, НПО «Энергия», ИЭС им. Е. О. Патона, ИПМ АН УССР, ЦНИИ КМ «Прометей», ПО «Алмаз» и др. Огромный вклад в создание вакуумных технологий и оборудования внесли работники перечисленных предприятий и организаций. Результаты сотрудничества были высоко оценены правительством присуждением Премии Совета Министров СССР в области науки и техники (1991). В составе творческого коллектива были ученые ИЭС им. Е. О. Патона, ЦНИИ КМ «Прометей», НПО «Энергия», в том числе три выпускника кафедры (В. Ф. Квасницкий, В. М. Емельянов и В. П. Николаенко).

В 1980-е годы активизируется подготовка научных кадров высшей квалификации. Над докторскими диссертациями работали доценты В. Ф. Квасницкий, А. И. Дремлюга, Ю. М. Лебедев, Г. В. Ермолаев, В. Н. Христенко. В 1988 г. докторскую диссертацию защитил доцент В. Ф. Квасницкий, а в 1995 г. — доцент Ю. М. Лебедев. Все разработки получили широкое промышленное внедрение.

Наряду с научной деятельностью совершенствуется учебный процесс. С переходом в главный учебный корпус были созданы новые учебные лаборатории, приобретено новое исследовательское оборудование. Нынешние идеи Болонского процесса были реализованы в 1985–1986 гг. Научные лаборатории широко использовались в учебном процессе, каждый дипломник выполнял научные исследования, входившие отдельным разделом в дипломный проект. Многократно увеличился объем хозяйственных работ, каждый сотрудник имел возможность повышать свой профессиональный и научный уровень. В штате кафедры и лабораторий было более 50 человек. Каждый дипломный проект, кроме научно-исследовательского раздела, имеет не менее трех инженерных расчетов, в том числе, выполненных с использованием ЭВМ. Студенты кафедры приобретают рабочую профессию сварщика. В соответствии с требованиями времени на кафедре с 2013/14 учебного года введены в специальность «7.05.05.04 — сварка» следующие специализации: сварка и родственные технологии в судостроении, энергомашиностроении; современные импульсные и вакуумные технологии в сварке, инженерии поверхности и медицине; подводные технологии сварки и родственные технологии. Все дисциплины обеспечены разработанными на кафедре учебными и методическими пособиями. Центральными издательствами опубликованы учебные пособия «Основы технологического проектирования сборочно-сварочных цехов», «Специальные способы сварки и пайка в судостроении»; монографии «Диффузионная сварка жаропрочных сплавов», «Сварка и пайка жаропрочных сплавов в судостроении»; учебник «Теория, технология и оборудо-



дование диффузионной сварки»; справочники «Диффузионная сварка материалов», «Diffusion Bonding of Materials», «Справочник по газовой резке, сварке и пайке».

Независимость Украины кафедра встретила с высокими результатами в научной и учебной работе. Несмотря на разрыв связей с научными организациями, предприятиями и вузами России, а также спад промышленного производства, кафедра не только сохранила свой потенциал, но и продолжала развиваться. В 1992 г. защищает кандидатскую диссертацию ассистент А. М. Костин, в 1993 г. — инженер В. А. Политов. На кафедру приходит талантливая молодежь, которая легко осваивает компьютерные технологии и системы управления технологическими процессами.

Формируется научное направление по источникам питания и машинам термической резки нового поколения. Для этого с электротехнического факультета приглашается канд. техн. наук Е. Н. Верещаго, имеющий опыт разработки новых образцов транзисторных источников питания с улучшенными сварочно-технологическими свойствами, технико-экономическими характеристиками и электромагнитной совместимостью для сварки, родственных процессов и технологий, в том числе источников питания с квазирезонансными принципами коммутации для плазменной резки металлов и сплавов серии PLASMA 110iHF. Последний отмечен дипломом во всеукраинском конкурсе-выставке «Лучший отечественный товар 2008 года».

В 2006–2008 гг. специалистами ООО НПФ «АМИТИ» совместно с кафедрой разработана конструкция сварочных выпрямителей для дуговой сварки и наплавки под флюсом серии ВДУ25-401, ВДУ25-506 и ВДУ26-630 (сертификат соответствия №UA1.012.0165143-06), защищенная патентом Украины на полезную модель №30840 МПК В23К 9/18. Авторы патента С. В. Драган, Ю. А. Ярослав, А. Ф. Галь награждены дипломом победителя Всеукраинского конкурса «Винахід — 2008» в номинации «Лучшее изобретение — 2008».

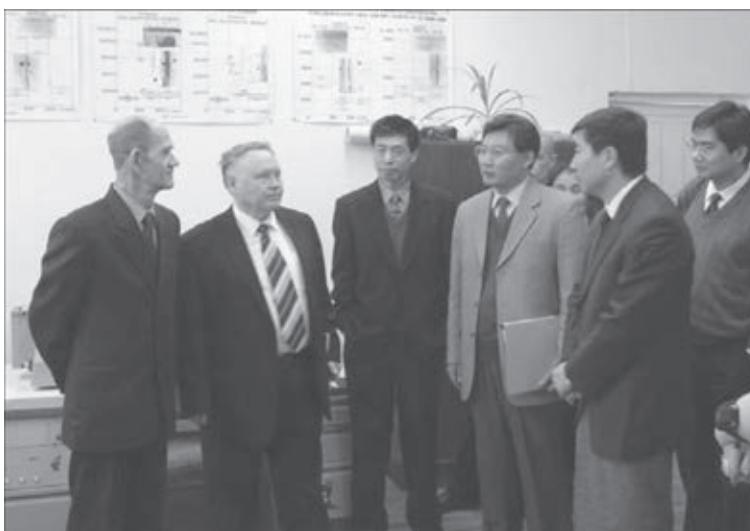
В 1994 г. решением Кабинета Министров Украины НКИ был преобразован в Национальный университет кораблестроения и получил статус высшего учебного заведения IV уровня. Согласно этому уровню аттестована и специальность кафедры сварочного производства.

В рамках международного сотрудничества кафедра наладила активные научные связи с вузами Китая, что способствовало совершенствованию материальной базы. В рамках международного контракта в 1993 г. на кафедре был создан собственный компьютерный класс.

В 1997 г. приобретен исследовательский комплекс для растровой электронной микроскопии и локального рентгеноспектрального микроанализа, создана соответствующая лаборатория, в которой проводятся физико-химические исследования, в том числе с использованием высокотемпературной металлографии. Все преподаватели кафедры имеют ученые степени и звания. Продолжается подготовка научной смены. В 1997 г. кандидатскую диссертацию защитил В. В. Квасницкий, в 2008 г. — В. А. Мартыненко.



Члены ГЭК (2008). Слева направо: С. В. Драган, Г. В. Ермолаев, Ю. М. Лебедев, В. Ф. Квасницкий, Г. М. Григоренко (председатель комиссии, д-р техн. наук, академик НАНУ)



Делегация Пекинского института авиационных материалов на кафедре сварочного производства (2008)



Подписание контракта (1993) НКУ им. Адмирала Макарова с Институтом судостроения Китая

SLV-1 земли Мекленбург-Форпоммерн. Благодаря активной поддержке президента НАН Украины академика Б. Е. Патона и помощи народного депутата Украины второго созыва проф. В. М. Емельянова работы НКУ и SLV-1 по подготовке и аттестации инженеров сварочного производства по Европейским нормам были включены в межгосударственную украинско-немецкую программу «Трансформ». В 1996 г. НКУ совместным Приказом № 96/87 Министерства образования и Министерства машиностроения Украины назначается Головной организацией по подготовке кадров сварочного производства всех уровней для судостроения. В 1997 г. университет и судостроительные предприятия Украины создают Судостроительный учебный центр сварочной техники, работающий совместно с SLV-1.

В 1998 г. первой группе в составе 24 ведущих специалистов сварочного производства судостроения, в том числе доцентам кафедры Г. В. Ермолаеву, В. В. Квасницкому, Л. П. Кравченко, послом Германии



Вручение президентом НАН Украины академиком Б. Е. Патонем и председателем комиссии SLV-1 г-ном Тутлисом директору завода «Океан» Н. П. Романчуку сертификатов «Европейского инженера сварочного производства» для выпускников Судостроительного учебного центра сварочной техники (1998)

В конце 1980-х годов на кафедре создано новое научное направление по исследованию напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке и пайке разнородных материалов, которое получило успешное развитие в 2000-е годы с появлением новой вычислительной техники и благодаря активной поддержке и помощи академика НАН Украины, зав. отделом ИЭС им. Е. О. Патона, д-ра техн. наук, проф. В. И. Махненко. По этому направлению защитили кандидатские диссертации А. В. Лабарткава в 2004 г., М. В. Матвиенко в 2013 г., докторскую диссертацию В. В. Квасницкий в 2010 г. С 1995 г. кафедра ведет плодотворную работу с Учебно-исследовательским центром сварочной техники

в Украине, президентом НАН Украины академиком Б. Е. Патонем и директором SLV-1 профессором П. И. Зайффартом были вручены дипломы «Европейский инженер по сварке». Через год Г. В. Ермолаев, В. В. Квасницкий, Л. П. Кравченко получили также дипломы международного инженера по сварке.

Несмотря на экономические проблемы, которые переживает Украина, на кафедре и в настоящее время проводятся фундаментальные научные исследования совместно с ИЭС им. Е.О. Патона с применением уникального оборудования и приборов. Только за последние пять лет выполнен ряд совместных работ с финансированием Государственными фондами Украины, России, Беларуси фундаментальных исследований. Результаты исследований ежегодно публикуются в виде статей, а также освещаются на международных конференциях.

Примером плодотворного сотрудничества может быть присуждение Государственной премии Украины 2011 г. сотрудникам НУК и ИЭС им. Е. О. Патона

за работы в области судостроения. За работу «Создание универсальных транспортных судов и средств океанотехники».

Важной особенностью всех выполняемых кафедрой научных работ является внедрение их результатов в промышленность. Одна из них «Новейшие технологии создания материалов и покрытий в судостроении» была отмечена премией Президента Украины для молодых ученых в 2013 г. Премия вручена ассистенту кафедры сварочного производства Ал. В. Лабарткава.

Преподаватели кафедры активно работают над изданием учебной литературы. Только за последние 15 лет издано 19 учебников и учебных пособий с грифом МОНУ и монографии, с участием кафедры издана Энциклопедия «Машиностроение», Том III-4: Технология пайки и резки под редакцией Б. Е. Патона, а также более 10 томов Правил классификации и постройки судов (Официальное издание регистра судоходства Украины).

За время существования кафедра подготовила около 3 тысяч инженеров сварочного производства. Среди выпускников более 100 докторов и кандидатов наук, заслуженные деятели науки и техники, заслуженные работники образования Украины, члены Королевского института кораблестроения, Института морской техники, науки и технологий, АН судостроения Украины.

В 2004 г. университет получил статус Национального, в чем есть лепта и коллектива кафедры сварочного производства. Становление и развитие кафедры стало возможным благодаря огромной помощи и участию многих научных и производственных коллективов и учебных заведений, среди которых ИЭС им. Е. О. Патона, ИПМ НАН Украины, ЦНИИ КМ «Прометей», ЦКТИ им. И. И. Ползунова, ЦНИИТМаш, МВТУ им. Н. Э. Баумана, Проблемная лаборатория диффузионной сварки в вакууме, МАТИ, Ленинградские кораблестроительный и политехнически институты, СПБ «Машпроект», ЮТЗ «Заря», НПО «Энергия», НИИ «Графит» и другие организации, ведущие ученые и специалисты которых лично участвовали как в учебном процессе, так и в научных разработках. Многие ученые перечисленных выше и других организаций и институтов (университетов) были председателями Государственных экзаменационных комиссий по защите дипломных проектов, общение с которыми, их советы и рекомендации по ученой и научной работе обеспечили развитие кафедры. Коллектив кафедры сварочного производства искренне благодарен всем, кто был причастен к сотрудничеству и надеется на его развитие.

В журнале представлена подборка научных статей ученых, специалистов и преподавателей Национального университета кораблестроения им. Адмирала Макарова, в которых отражены достижения, полученные в последние годы.



Лауреаты Государственной премии Украины в области науки и техники (2012). Слева направо: К. В. Кошкин, С. С. Рыжков, Ю. Д. Жуков, И. В. Кривцун, В. А. Некрасов, Г. В. Егоров, В. С. Блинцов, В. Ф. Квасницкий вместе с академиком Б. Е. Патонем (в центре)



Коллектив кафедры сварочного производства (2014). Стоят слева направо: В. А. Мартыненко, Е. Н. Верещаго, С. В. Драган, Л. П. Кравченко, Б. В. Бугаенко, председатель ГЭК С. Ю. Максимов (ИЭС им. Е. О. Патона), В. Ф. Квасницкий, А. М. Костин, А. В. Лабарткава, С. Ю. Крамаренко, Г. В. Ермолаев, Ал. В. Лабарткава

В. М. Емельянов, Б. В. Бугаенко,  
А. М. Костин, В. А. Мартыненко

## ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКЕ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

В. В. КВАСНИЦКИЙ<sup>1</sup>, В. Ф. КВАСНИЦКИЙ<sup>2</sup>, Л. И. МАРКАШОВА<sup>3</sup> М. В. МАТВИЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, г. Киев, просп. Победы, 37 E-mail: kvas69@ukr.net

<sup>2</sup> Нац. ун-т кораблестроения им. Адмирала Макарова. 54025, г. Николаев, просп. Героев Сталинграда, 9.  
E-mail: welding@nuos.edu.ua

<sup>3</sup> ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Компьютерным моделированием напряженно-деформированного состояния (НДС) с учетом изменения физико-механических свойств, структурных превращений, деформаций ползучести установлено, что при диффузионной сварке (ДС) разнородных материалов пластические деформации распределяются по стыку неравномерно. Результаты же механических испытаний сварных соединений дают интегральную оценку сварного соединения, а не по различным зонам стыка. Цель работы – установление влияния НДС на структуру и свойства соединений в различных зонах стыка при постоянной температуре ДС и с термоциклированием. Сваривали сталь 12Х18Н10Т с электротехнической сталью 10864 (армо-железо) при постоянной температуре 1050 °С и с двумя термоциклами 700...1000 °С. Сварные соединения подвергали микроструктурному и локальному рентгеноспектральному микроанализу, исследовали распределение микротвердости. Учитывая зависимость плотности дислокаций от величины и интенсивности пластической деформации, большое внимание уделено исследованию тонкой структуры металла в зоне стыка и оценке конкретного вклада различных структурных составляющих в общее значение предела текучести сварных соединений. Проведенные исследования подтвердили результаты компьютерного моделирования НДС и наличие значительной зоны деформационного застоя при ДС при постоянной температуре. Установлено, что ДС с термоциклированием позволяет управлять НДС, интенсифицировать процессы объемного взаимодействия и обеспечивать равнопрочность соединений со сталью 10864. Библиогр. 12, рис. 6.

*Ключевые слова:* диффузионная сварка, моделирование НДС, термоциклирование, структура, пластические деформации, механические свойства, диффузия

Развитие техники в различных отраслях промышленности требует применения разнородных материалов при изготовлении деталей и узлов для повышения эффективности их эксплуатации. Одним из перспективных способов соединения этих материалов является диффузионная сварка (ДС) в вакууме [1, 2]. К настоящему времени выполнены соединения более 800 видов пар различных материалов [3]. Основной проблемой ДС является нестабильность формирования соединений по площади стыка и при изменении геометрии сварных узлов, что объясняют масштабным фактором. При разработке режима сварки, оценивая пластические деформации, являющиеся главным фактором формирования соединений, обычно исходят из равномерного распределения усилия сжатия по площади стыка. В действительности, еще в работах [4, 5] Ю. Л. Красулин показал, что деформации распределяются по стыку неравномерно, образуя центральную зону без следов взаимодействия. В диссертации В. Н. Столярова (ЦКТИ) при сварке цилиндрических образцов жаропрочных сплавов ЭИ607А и ЭИ869 по характеру разрушения при испытании установлено, что наиболее слабые

участки соединения располагаются в центральной зоне вблизи оси. При сварке заготовок большого диаметра и испытаниях образцов такие зоны не наблюдали.

Для изучения закономерностей формирования соединений в различных зонах стыка в работах [5, 6] использовали аналитические методы моделирования, применявшиеся в теории обработки металлов давлением [7, 8], которые не позволяют учесть влияние многих переменных факторов на напряженно-деформированное состояние (НДС) в зоне стыка, в том числе изменения физико-механических свойств, структурных превращений, деформаций ползучести и других факторов, которые позволяют учесть компьютерное моделирование. Выполненные под руководством В. И. Махненко исследования [9, 10] позволили установить закономерности формирования НДС в условиях упругости, мгновенной пластичности и ползучести при ДС разнородных материалов с учетом их изменяющихся физико-механических свойств, геометрических и конструктивных факторов, а также возможность управлять НДС в зоне стыка при ДС при изменяющейся температуре (с термоциклиро-

ванием), в отличие от ДС при постоянной температуре по классической схеме.

Эффективность ДС с термоциклированием подтверждена результатами механических испытаний сварных соединений, которые дают интегральную оценку, а не по различным зонам стыка. Поэтому проведение данных исследований является актуальным.

Цель настоящей работы — установление влияния НДС на структуру и свойства соединений в различных зонах стыка при ДС с термоциклированием и при постоянной температуре. Идея проведения исследований, описанных ниже, принадлежала академику НАН Украины В. И. Махненко.

В работе исследовали сварку стали 12X18H10T и 10864 в вакууме  $10^{-2}$  Па по классической схеме ДС при постоянной температуре 1050 °С, давлении 15 МПа с выдержкой 12 мин и с двумя термоциклами в интервале температур 750...1000 °С с выдержкой 2 мин при 1000 °С. После второго цикла нагрев продолжали до 1050 °С с выдержкой 6 мин и последующим охлаждением как и в первом случае. Использовали цилиндрические образцы диаметром 12 мм. Сталь 12X18H10T относится к немагнитным коррозионностойким жаропрочным сталям аустенитного класса и содержит не более 0,08...0,12 % углерода, 17...19 % хрома, 9...11 % никеля и до 0,8 % титана. При комнатной температуре условный предел текучести составляет не менее 200 МПа, предел прочности — не менее 500 МПа, относительное удлинение и сужение не менее 40...55 %. Сталь 10864 относится к магнитным сталям ферритного класса, которая применяется при изготовлении корпусов электромагнитов, и содержит до 0,035 % углерода, около 0,3 % кремния и марганца, до 0,1 % никеля и 0,03 % хрома. Предел текучести составляет не менее 215 МПа, предел прочности и относительное удлинение — не менее 320 МПа и 33 %.

После сварки образцы разрезали по диаметру и исследовали по линиям, параллельным оси и проходящим через зоны 0, А и Б, т. е. по оси, середине радиуса и вблизи боковой поверхности образца соответственно, как показано на рис. 1.

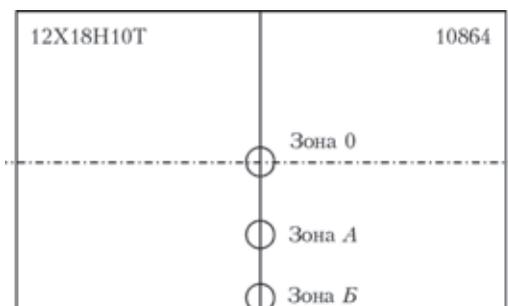


Рис. 1. Схема сварного цилиндрического образца из сталей 12X18H10T и 10864

Сварные соединения подвергали микроструктурному и локальному рентгеноспектральному микроанализу, а также исследовали распределение микротвердости.

ДС характеризуется низкими интенсивностями и значениями пластических деформаций. Деформирование происходит со скоростями  $10^{-4}...10^{-3}$  с $^{-1}$  по дислокационному механизму, пластическая деформация рассматривается как процесс образования новых дислокаций и их движения по кристаллу [11]. Выход на соединяемые поверхности дислокаций и их скоплений сопровождается выносом атомов со свободными силами связей, образующих активный центр соединения. В пределах активных центров происходит разрыв старых связей с кислородом оксидной пленки и образование новых между поверхностными атомами соединяемых деталей. Таким образом, происходит деформационная активация поверхностей и их схватывание (установление межатомных связей). Частота выхода дислокаций определяется интенсивностью пластической деформации [11]. На первой стадии легкого скольжения плотность дислокаций почти не изменяется и составляет около  $10^8$  см $^{-2}$ . На второй стадии возникает нерегулярная сетка дислокаций. Средняя плотность дислокаций в начале второй стадии повышается до  $10^9$ , в конце  $10^{10}$  см $^{-2}$ . Локальная плотность дислокаций достигает  $10^{11}$  см $^{-2}$ . На третьей стадии наблюдается появление широких полос скольжения, что обусловлено поперечным скольжением винтовых компонент дислокаций, промежутки между которыми заполняются тонкими, короткими линиями скольжения.

Учитывая четкую зависимость плотности дислокаций от значения и интенсивности пластической деформации, в работе большое внимание уделено исследованию тонкой структуры металла в зоне стыка. При этом применяли методы оптической металлографии, аналитической растровой (СЭМ-515 фирмы «Philips») и просвечивающей микродифракционной электронной микроскопии на установке JEM-515 фирмы «JEOL» с энергодисперсионными и волновыми спектрометрами, а также на установке Comebax марки SX-50. Метод просвечивающей электронной микроскопии позволяет выявлять также сегрегационные процессы, связанные с диффузией.

В работах [9, 10] установлено, что при постоянной температуре в центральной зоне цилиндрического образца, как и при сварке узла втулка-втулка, на некотором расстоянии от внутренней поверхности (между внутренней поверхностью и серединой толщины втулки) имеется зона с минимальными пластическими деформациями, в которой касательные напряжения равняются нулю. Эта зона названа зоной деформационного застоя.

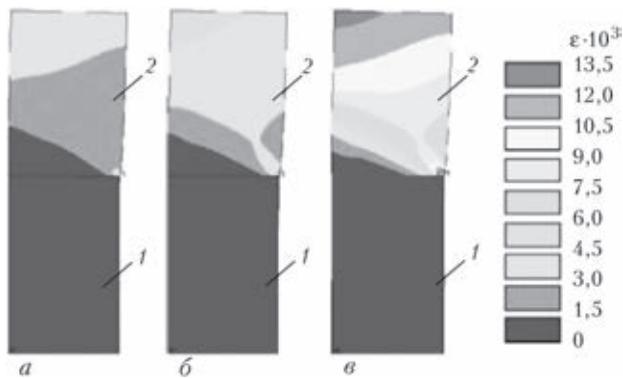


Рис. 2. Изменение эквивалентных пластических деформаций в сечении осесимметричной половины образца при ДС сталей 12Х18Н10Т (1) и 10864 (2) по классической схеме при времени сварки 90 (а), 120 (б), 300 с (в)

На рис. 2 показаны поля эквивалентных пластических деформаций с учетом деформаций ползучести при сжатии образцов давлением 15 МПа при постоянной температуре. Поля сдвиговых пластических деформаций не показаны, поскольку уровень их низкий.

Из рис. 2 видно, что пластические деформации при постоянной температуре сварки начинают развиваться из цилиндрической поверхности стали 10864, медленно расширяя свою область к центру образца и интенсивно развиваются вдали от стыка. Такое НДС приводит к развитию деформаций сварного узла за зоной стыка и является неблагоприятным для формирования соединения. Результаты моделирования показывают, что при ДС с термоциклированием формируется НДС, благоприятное для активации поверхностей и образования соединений по всей площади стыка (рис. 3).

Анализ полей пластических деформаций (рис. 3) показывает, что при термическом нагружении эквивалентные и сдвиговые деформации локализуются в зоне стыка, что близко к идеальному варианту обеспечения деформационного механизма активации соединяемых поверхностей. Поля распределения пластических деформаций в зоне стыка в конце каждого цикла изменяются мало, но в процессе нагрева положение зоны деформационного застоя несколько изменяется, что способствует более равномерному распределению деформаций по стыку. Этому способствует также проскальзывание поверхностей на первом этапе формирования соединения.

Результаты исследования тонкой структуры соединений сталей 12Х18Н10Т и 10864 при постоянной температуре ДС и сварке с термоциклированием показаны на рис. 4. Исследования строения металла соединения в зоне 0 на электронном микроскопе при увеличениях ( $\times 15000 \dots 50000$ ) показали, что при постоянной температуре ДС в зоне стыка формируется протяженная полоса ши-

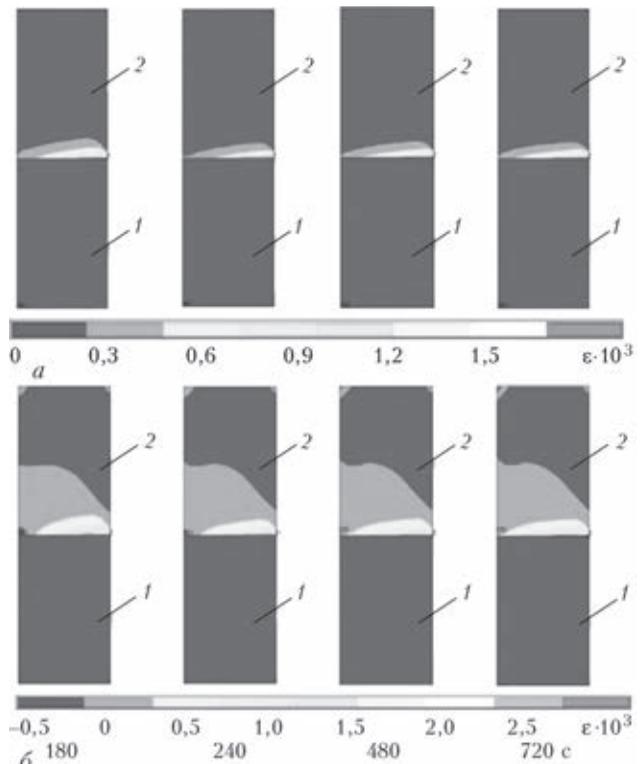


Рис. 3. Изменение полей эквивалентных (а) и сдвиговых (б) пластических деформаций в сечении осесимметричной половины образца при ДС с термоциклированием сталей 12Х18Н10Т (1) и 10864 (2) в течение первого цикла (180, 240 с), после второго (480 с) и после третьего (720 с)

риной 1,8...2,7 мкм смятия поверхностных слоев со стороны стали 10864 при сохранении поверхности со стороны стали 12Х18Н10Т. Инертность контактирующей поверхности со стороны аустенитной стали подтверждается стабильностью границы раздела и наличием на этой границе поверхностных оксидов (рис. 4, а), которые являются барьерами для установления связей между поверхностными атомами соединяемых металлов и рекристаллизации. Устранение этих барьеров возможно путем их диффузионного растворения, однако даже при ДС никеля для этого требуется длительное время [11]. Пластическая деформация металла в стыке способствует удалению оксидов по схеме механическое разрушение — диспергирование — диффузионное растворение оксидов, что интенсифицирует взаимодействие (схватывание) соединяемых материалов. При этом участки хрупкого скола, наблюдаемые в начальной стадии в зоне расположения оксидных пластин, сменяются участками вязкого разрушения.

Вдоль границы раздела в зоне 0 деформация отмечается только со стороны стали 10864 с максимальной глубиной деформированного слоя 2,8 мкм. Со стороны аустенитной стали непосредственно в зоне контакта 0...2 мкм выявляется небольшое повышение плотности дислокаций, характерных для начальной стадии формирова-

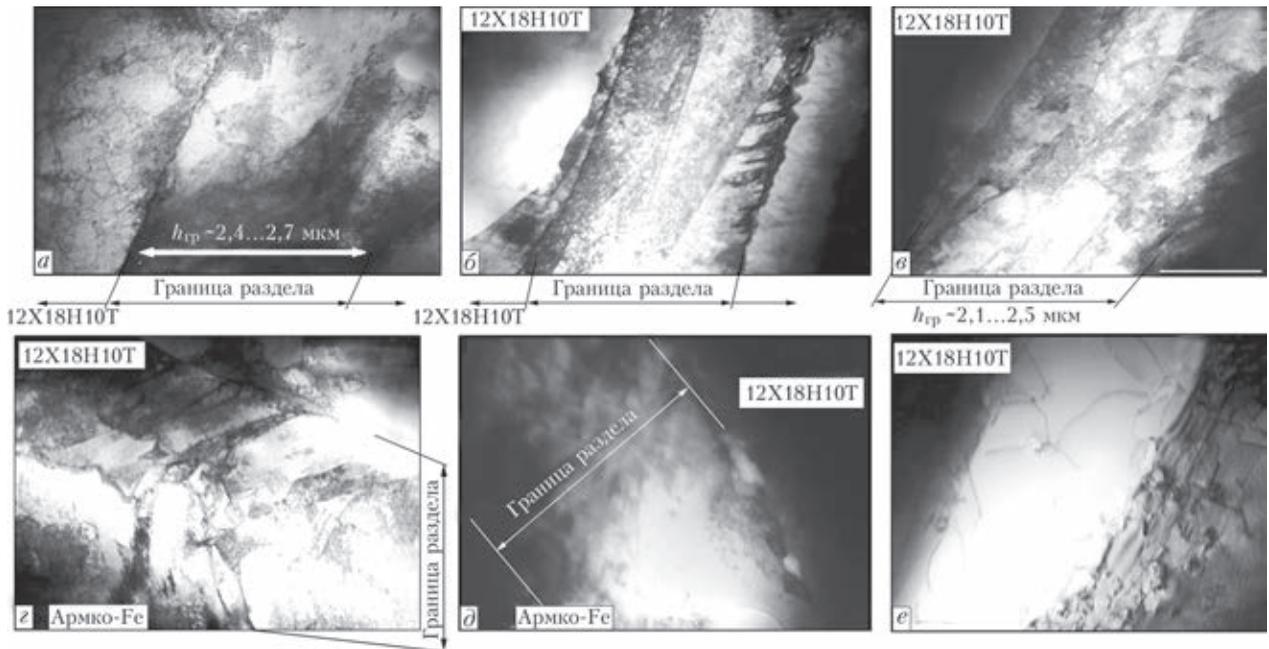


Рис. 4. Тонкая структура сварного соединения сталей 12X18H10T и 10864, полученного при постоянной температуре ДС в зоне стыка 0 (а), А (б), Б (в), а также полученного при ДС с термоциклированием в зоне стыка 0 (з), А (д) и Б (е) (а, в, з —  $\times 20000$ ; б, д, е —  $\times 30000$ )

ния блочных структур, но с увеличением расстояния от стыка до 10..80 мкм выявляются только единичные, бессистемно расположенные дислокации при той же плотности, что и вдали от стыка. Там выявляются характерные для аустенитной стали отдельные двойники на фоне равномерного распределения дислокаций при их минимальной плотности  $10^8 \text{ см}^{-2}$ , что свидетельствует о незначительной деформации на поверхности стали 12X18H10T.

В зоне А стыка (рис. 4, б) вдоль контактирующих поверхностей наблюдаются протяженные полосовые структуры, в которых резко увеличивается плотность дислокаций, свидетельствующая о высокой интенсивности деформирования. Особенно важно то, что в указанной зоне происходит приповерхностная активация деформационных процессов со стороны аустенитной стали. Внутриверхностная плотность дислокаций возрастает до  $10^{11} \text{ см}^{-2}$ , увеличивается количество систем скольжения, а также наблюдаются процессы фазообразования. В зоне дислокационных скоплений и развития систем скольжения наблюдается формирование высокодисперсных фаз диаметром  $d_{\text{фв}} = 0,03...0,05 \text{ мкм}$ . Структурные изменения в аустенитной стали наблюдаются в слое глубиной до 100 мкм от стыка.

В зоне А стыка со стороны стали 10864 формируется ячеистая и субзеренная структура с размерами  $d_c = 0,13...0,3 \text{ мкм}$ . В приконтактной зоне деформационная активация металла интенсифицируется, о чем свидетельствует увеличение общей плотности дислокаций и формирование протяженных дисперсных полосовых структур с четкими межзеренными границами.

Характер структур металла свидетельствует о накоплении энергии в зоне А, но релаксационные процессы находятся на начальной стадии.

Структура металла в зоне Б (рис. 4, в) стыка свидетельствует о том, что активно протекающие процессы пластической деформации переходят в стадию развития релаксации: наблюдается перераспределение общей плотности дислокаций с увеличением размеров и равноосности структуры (зерен и субзерен), формирование более равновесных высокоугловых границ и областей с общими зернами, т. е. с установленными внутрикритическими межатомными связями соединяемых металлов.

Активно протекают процессы релаксации (перераспределение дислокаций, увеличение размеров зеренной и субзеренной структуры), перестройка дефектов кристаллической структуры (уменьшение плотности дислокаций в теле зерна и совершенствование границ). Интенсивность релаксационных процессов со стороны стали 12X18H10T прослеживается на расстоянии до 150 мкм от стыка. В этой области происходит увеличение размеров формирующихся фаз  $d_{\text{фв}}$  до 0,3 мкм, что также подтверждает активационную роль термомеханических процессов в зоне Б сварных соединений.

Результаты исследования структуры соединений сталей 12X18H10T и 10864 при ДС с термоциклированием приведены на рис. 4, з-е.

В зоне 0 область взаимодействия сталей имеет ширину около 2,1 мкм с четко выраженной блочной структурой протяженной формы и размерами блоков около  $0,25 \times 2,0 \text{ мкм}$  (рис. 4, з). Протяжен-

ность и форма блоков, а также слоистый характер их распределения в зоне стыка свидетельствуют о направленности и высокой интенсивности локальной пластической деформации под действием нагружения внешним сжатием и термического нагружения, обусловленным различающимися физико-механическими свойствами соединяемых материалов.

Дисперсность структуры, высокая плотность дислокаций с максимальным значением до  $10^{11}$  см<sup>-2</sup>, блочная морфология с четкими межблочными границами подтверждают высокий уровень деформаций.

На некоторых участках стыка наблюдаются области сегрегационных высокодисперсных скоплений с размером частиц 0,05...0,12 мкм, что является свидетельством активного протекания процессов массопереноса.

Непосредственно у стыка со стороны аустенитной стали в области глубиной до 70 мкм наблюдаются процессы интенсивного перераспределения дислокаций с множественными следами скольжения, а также декорирование дислокаций легирующими элементами и формирование фазовых образований с размерами  $d_{\text{фв}} = 0,1...0,15$  мкм. Равновесное состояние структуры металла отмечено на расстоянии около 300 мкм от стыка.

Со стороны стали 10864 в области контактного взаимодействия наблюдается плотность дислокаций  $10^9...10^{10}$  см<sup>-2</sup> с формированием дислокационных скоплений, ячеек и дисперсных блоков. При удалении от стыка плотность дислокаций падает до  $10^8$  см<sup>-2</sup>, что свидетельствует об активации релаксационных процессов. Непосредственно в зоне контакта и на некотором расстоянии от стыка кроме сегрегаций на отдельных дислокациях происходит формирование фазовых выделений как мелкодисперсных, так и более крупных. Особенно активно формируются новые фазы вдоль межзеренных границ.

В зоне *A* (рис. 4, *д*) формируются новые дисперсные более равноосные структуры релаксационного характера. Со стороны стали 12X18H10T на расстоянии 5...10 мкм от стыка для структуры характерны следы активного протекания пластической деформации при значительном уровне дислокационной плотности с четким двойникованием микрообъемов зерен. Наблюдаются также процессы, связанные с сегрегацией элементов и примесей (диффузия), а также зарождением новых фаз на дислокационных скоплениях как на начальной стадии, так и фаз, имеющих четкую морфологию и размерность.

По всей ширине полосы пластических деформаций стали в зоне стыка наблюдаются следы скольжения, формирование сегрегаций и новых дисперсных фаз.

В зоне *B* стыка структура металла характеризуется нечетко выраженными равноосными зернами размером  $d_c$  порядка 1,3...3,0 мкм с суб- и межзеренными границами (рис. 4, *е*). Для этой зоны характерны активное фазообразование, дисперсность которых составляет  $d_{\text{фв}} = 0,01...0,04$  мкм, а также скопление дислокаций как по телу, так и по границам структурных элементов. В микрообъемах аустенитной стали на расстоянии 5...10 мкм от стыка структура идентична той, что формируется непосредственно у стыка, по виду, распределению и размерам фазовых выделений ( $d_{\text{фв}} = 0,03...0,08$  мкм). Плотность дислокаций составляет около  $10^{10}$  см<sup>-2</sup>. Однако уже на расстоянии около 20 мкм от стыка происходит резкое увеличение зеренной структуры и снижение плотности дислокаций до  $6 \cdot 10^8$  см<sup>-2</sup>. Фазовые выделения укрупняются примерно на порядок ( $d_{\text{фв}} = 0,3...0,7$  мкм), а их количество уменьшается. С увеличением расстояния от стыка до 250...400 мкм структура стали 12X18H10T не отличается от структуры основного металла.

Структуры сталей в зонах *B*, *A* при ДС с термоциклированием и *B* при постоянной температуре сварки идентичны, что свидетельствует об интенсивном развитии релаксационных процессов. Это подтверждает также микротвердость сталей. В сечении по зоне *B* микротвердость обеих сталей ниже, чем в зонах *A* и *0*, где релаксационные процессы не развиваются при постоянной температуре ДС.

Глубина взаимной диффузии в зонах *A* и *B* соединяемых сталей составляла 8...14 мкм по различным элементам. При ДС с термоциклированием даже в зоне *0* ширина диффузионной зоны (рис. 5, *а*) существенно превышает принятый в литературе критерий прочности по ширине диффузионной зоны 3...5 мкм [1]. Формирование переходного слоя между сталями 12X18H10T и 10864 показано на рис. 5, *б*.

Анализ полученных результатов исследования тонкой структуры и химического состава металла в зоне стыка показывает, что ДС с термоциклированием обеспечивает формирование соединений без дефектов и хрупких фаз по всей площадке стыка. Диффузионная пористость в зоне диффузии отсутствует. Механические испытания показали, что разрушение сварных соединений имеет вязкий характер и происходит по стали 10864 вне зоны соединения.

Результаты исследований тонкой структуры и формирования соединений подтверждают результаты компьютерного моделирования НДС при ДС сталей 12X18H10T и 10864, полученные в работе [6], а также приведенные на рис. 2 и 3. В отличие от ДС при постоянной температуре при ДС с термоциклированием пластические деформации про-

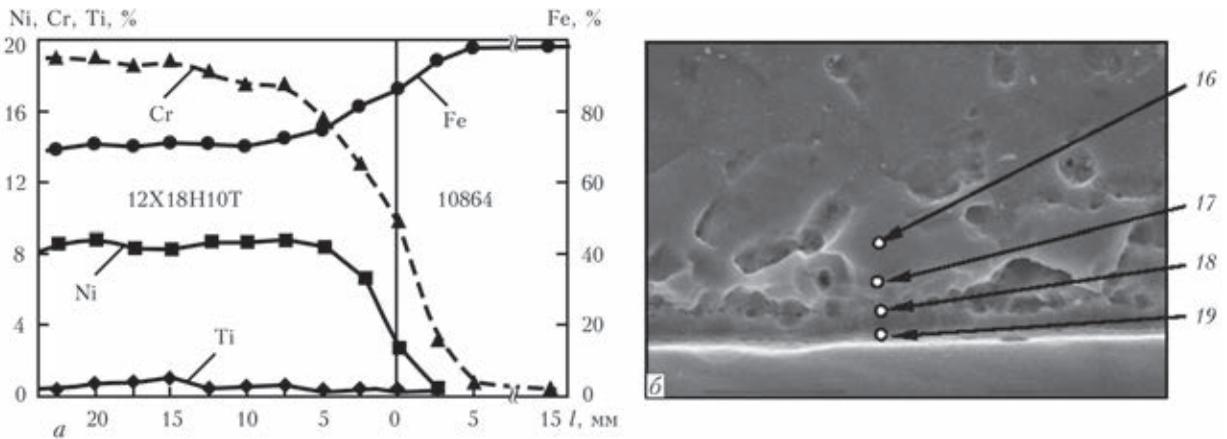


Рис. 5. Распределение элементов (а) и микроструктура (б,  $\times 4020$ ) металла в зоне стыка соединения сталей 12X18H10T и 10864 (химический состав, мас. %) в точках: 16 — 78,7 Fe, 5,36 Ni, 14,3 Cr, 0,56 Ti; 17 — 79,9 Fe, 5,36 Ni, 12,27 Cr, 0,53 Ti; 18 — 86,4 Fe, 3,2 Ni, 9,8 Cr; 19 — 92,47 Fe; 1,3 Ni; 6,2 Cr

ходят по всей площади стыка, что гарантирует качество сварных соединений.

Выполненный комплекс экспериментальных исследований структурных составляющих (размеров зерен и субзерен, плотности дислокаций, размеров и распределения фазовых выделений), формирующихся в металле в различных термодеформационных условиях, позволяет провести аналитические оценки конкретного вклада различных структурных составляющих в общее значение механической характеристики сварных соединений сталей 12X18H10T и 10864 в различных зонах стыка при постоянной температуре ДС (традиционная схема) и ДС с термоциклированием. Такой характеристикой принят предел текучести металла в зоне соединения [12]. При этом принимали, что значение  $\sigma_{0,2}$ , согласно уравнению Арчарда, включающему известные зависимости Холла–Петча, Орованна, Эшби, Армстронга, Пайерса–Набарро, Конрада и др. записывается формулой

$$\Sigma\sigma_{0,2} = \Delta\sigma_0 + \Delta\sigma_{тр.} + \Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_c + \Delta\sigma_d + \Delta\sigma_{д.у.},$$

где  $\Delta\sigma_0$  — сопротивление решетки металла движению свободных дислокаций (напряжение трения решетки или напряжение Пайерса–Набарро);  $\Delta\sigma_{тр.}$  — упрочнение твердого раствора легирующими элементами и примесями (твердорастворное упрочнение);  $\Delta\sigma_3$ ,  $\Delta\sigma_c$  — упрочнение за счет изменения величины зерна и субзерна (зависимости Холла–Петча, зернограничное и субструктурное упрочнение);  $\Delta\sigma_d$  — дислокационное упрочнение, обусловленное междислокационным взаимодействием;  $\Delta\sigma_{д.у.}$  — упрочнение за счет дисперсных частиц по Орованну (дисперсионное упрочнение).

Полученные результаты исследования тонкой структуры металла в зоне стыка использовали для количественной оценки влияния различных структурных факторов на предел текучести металла в зонах 0, А, Б при традиционной схеме ДС и ДС с термоциклированием. Составляющие компоненты напряжений в уравнении Арчарда определяли со-

гласно работе [12]. Результаты расчетов приведены на рис. 6.

Аналитические оценки конкретного (дифференцированного) вклада различных структурно-фазовых параметров в изменение прочностных характеристик ( $\Sigma\sigma_{0,2}$ ) показали, что наибольшее повышение общего (интегрального) значения предела текучести  $\Sigma\sigma_{0,2}$  наблюдается в зоне Б при постоянной температуре ДС и в зоне А при ДС с термоциклированием. При ДС с термоциклированием в зоне А наблюдаются, согласно аналитическим оценкам, более высокие значения предела текучести по сравнению с зоной Б без термоциклирования за счет большего субзеренного упрочнения как со стороны стали 10864, так и со стороны стали 12X18H10T, а также за счет увеличения плотности дислокаций и фазовых выделений со стороны стали 12X18H10T.

В зоне Б образца, полученного при ДС с термоциклированием, аналитическая оценка не проводилась, так как высокое качество формирования соединения в этой зоне не вызывает сомнения ни по одному из параметров.

Наихудшие условия формирования соединения при традиционной схеме сварки наблюдаются в зоне 0, в которой деформации сдвига отсутствуют и сохраняются оксидные пленки. В этой зоне начинается разрушение образцов, особо четко проявляющееся при испытаниях на длительную прочность.

Результаты аналитической оценки прочности соединений в различных зонах стыка хорошо согласуются с результатами моделирования НДС при ДС и подтверждают эффективность ДС с термоциклированием разнородных материалов.

Разработанная технология использована для производства промышленных изделий со сваркой пяти деталей по четырем стыкам одновременно.

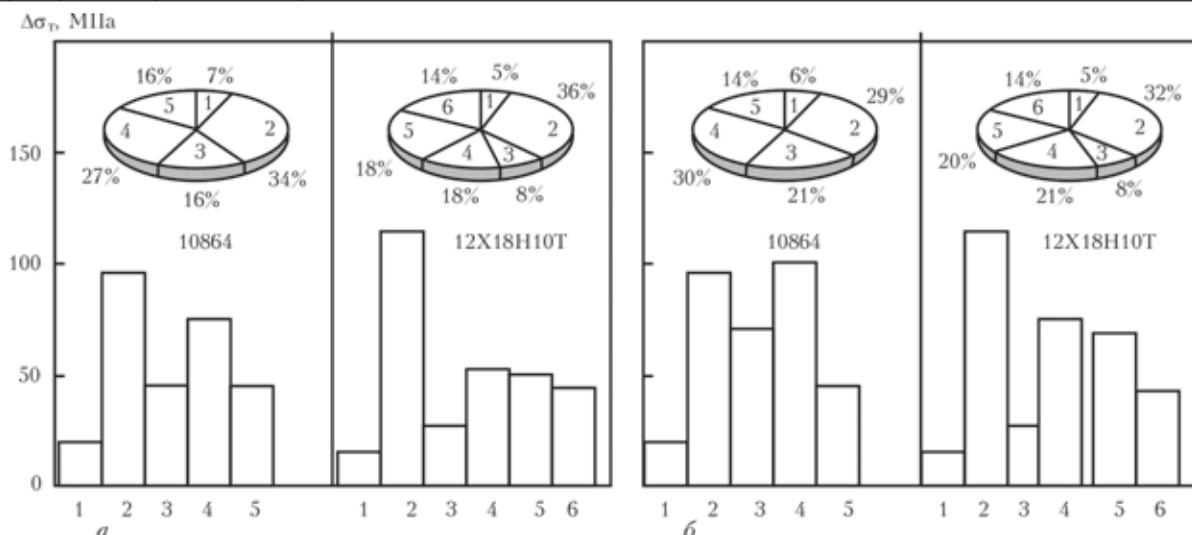


Рис. 6. Влияние структурных факторов на предел текучести металла и долю составляющих в пределе текучести в стыке при ДС по традиционной схеме при постоянной температуре (а) и ДС с термоциклированием (б) в зоне 0: 1 —  $\Delta\sigma_0$ ; 2 —  $\Delta\sigma_{т.р}$ ; 3 —  $\Delta\sigma_3$ ; 4 —  $\Delta\sigma_c$ ; 5 —  $\Delta\sigma_d$ ; 6 —  $\Delta\sigma_{д.у}$

### Выводы

1. Экспериментальные исследования структуры, распределения микротвердости в соединениях металлов, обусловленных пластической деформацией, аналитическая оценка прочности соединений в различных зонах подтверждают результаты компьютерного моделирования НДС, показавшие неравномерное распределение пластических деформаций по площади стыка при ДС разнородных материалов и неодинаковые условия формирования соединений, в том числе наличие зоны деформационного застоя.

2. Аналитическая оценка влияния различных структурных факторов на прочностные характеристики металла показала, что при ДС сталей 12X18H10T и 10864 по традиционной схеме в центральной зоне стыка (зона 0) предел текучести имеет самое низкое значение как со стороны стали 10864, так и со стороны стали 12X18H10T.

3. При ДС с термоциклированием в повышении предела текучести металла в этой же зоне наибольший вклад вносят субзеренное, зеренное и дислокационное упрочнение.

4. Диффузионная сварка разнородных металлов с термоциклированием позволяет управлять НДС, интенсифицировать пластические деформации по стыку, процессы рекристаллизации, диффузии и равнопрочность соединений со сталью 10864.

1. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка материалов. — М.: Машиностроение, 1976. — 312 с.
2. Derby B. Solid state diffusion bonding: A joining and materials fabrication process // Hart- und Hoch-temperaturloten und Diffusionsschweissen: Vorträge und Posterbeiträge des 5. Intern. Kolloquium in Aachen vom 16. bis 18. Juni 1998 // DVS-Berichte, 1998, Bd. 192/— S. 100–103.
3. Люшинский А. В. Диффузионная сварка разнородных материалов. — М.: Академия, 2006. — 208 с.
4. Красулин Ю. Л. Взаимодействие металлов с полупроводниками в твердой фазе. — М.: Наука, 1971. — 119 с.
5. Красулин Ю. Л., Назаров Г. В. Микросварка давлением. — М.: Металлургия, 1976. — 274 с.
6. Диффузионная сварка в вакууме дисперсионно-твердеющих жаропрочных сплавов с прокладками / Г. В. Ермолаев, Н. П. Житников, В. М. Заболотский и др. // Судостроительная пром-сть. Сер. Сварка. — 1988. — Вып. 6. — С. 13–23.
7. Унсов Е. П. Инженерные методы расчета усилий при обработке металлов давлением. — М.: Машгиз, 1955. — 280 с.
8. Тарновский И. Я., Леванов А. Н., Поксваткин М. И. Контактные напряжения при пластической деформации. — М.: Металлургия, 1966. — 279 с.
9. Махненко В. И., Квасницкий В. В. Напряженно-деформированное состояние узла цилиндрической формы при диффузионной сварке // Автомат. сварка. — 2009. — № 2. — С. 5–10.
10. Махненко В. И., Квасницкий В. В. Особенности формирования напряженно-деформированного состояния соединений разнородных материалов, полученных диффузионной сваркой // Там же. — 2009. — № 8. — С. 11–16.
11. Бокиштейн С. З. Строения и свойства металлических сплавов. — М.: Металлургия, 1971. — 496 с.
12. Гольдштейн М. И., Литвинов В. С., Бронфин Б. М. Металлофизика высокопрочных сплавов. — М.: Металлургия, 1986. — 312 с.

Поступила в редакцию 30.05.2014

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ СОЗДАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПРОСЛОЕК ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ

**В. Ф. КВАСНИЦКИЙ<sup>1</sup>, В. В. КВАСНИЦКИЙ<sup>2</sup>, Н. Н. ЧЕРЕНДА<sup>3</sup>, Н. Н. КОВАЛЬ<sup>4</sup>, И. Л. ЛЕВЧЕНКО<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Нац. ун-т кораблестроения им. Адмирала Макарова. 54025, Украина, г. Николаев, просп. Героев Сталинграда, 9.  
E-mail: welding@nuos.edu.ua

<sup>2</sup> НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, Украина, г. Киев, просп. Победы, 37. E-mail: kvas69@ukr.net

<sup>3</sup> Белорус. гос. ун-т. 220030, Беларусь, г. Минск, просп. Независимости, 4.

E-mail: cherenda@bsu.by

<sup>4</sup> ФГБУ Ин-т сильноточной электроники СО РАН.

634055, Россия, г. Томск, просп. Академический, 2/3. E-mail: contact@hcei.tsc.ru

Радиационно-пучковые технологии, применяемые для модифицирования, в том числе с легированием поверхностей, обеспечивают необходимую топографию поверхности, ее активацию, повышение адгезионных свойств, требуемые структуру и химический состав поверхности. Эти характеристики являются определяющими в дальнейшем при диффузионной сварке, пайке и нанесении покрытий. В работе использованы низкоэнергетические сильноточные электронные пучки и высокоэнергетические плазменные потоки для модифицирования и легирования соединяемых поверхностей сталей и жаропрочных сплавов. Эти виды обработки поверхности относятся к радиационно-пучковым технологиям. Обработку проводили низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками в вакууме  $10^{-2}$  Па на установке «СОЛО» Института сильноточной электроники СО РАН, а также высокоэнергетическими плазменными потоками с использованием магнетроноплазменного компрессора компактной геометрии (МПККГ) Белорусского государственного университета при давлении водорода или азота  $3 \cdot 10^2$  Па, а сварку и пайку — на установке УДСВ-ДТ в вакууме  $10^{-2}$  Па или сверхвысоковакуумном универсальном технологическом комплексе ВВУ-1Д в вакууме  $10^{-5}$  Па. Независимо от исследуемых металлов для всех модифицированных слоев характерно формирование на поверхности субмикроструктурной структуры, наличие высокой плотности дислокаций (до  $10^{11}$  см<sup>-2</sup>), появление напряжений 3-го рода, свидетельствующих о существенном повышении уровня энергии, аккумулированном в модифицированном слое. Поверхности жаропрочных никелевых сплавов легировали цирконием и гафнием, которые являются наиболее перспективными депрессантами никелевых припоев. Для этого на поверхность методом ионно-плазменного напыления наносили слой легирующего элемента толщиной 1...3 мкм, а затем переплавляли поверхностный слой низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками и высокоэнергетическими плазменными потоками. Исследования процессов формирования модифицированных и легированных поверхностей показали возможность эффективного управления структурой и составом модифицированного слоя. Диффузионная сварка в твердом состоянии и с расплавляющейся прослойкой обеспечивает высокое качество соединений, о чем свидетельствуют структуры и механические свойства соединений. Применение радиационно-пучковых технологий позволяет расширить возможности соединения металлов и упрочнения материалов. Библиогр. 13, рис. 6.

*Ключевые слова:* модифицирование поверхности, электронный пучок, высокоэнергетический плазменный поток, диффузионная сварка, пайка

Эксплуатационные параметры современных газотурбинных двигателей, изделий новой техники можно повысить путем применения композиционных и разнородных конструкционных материалов, а также технологий формирования на их поверхности модифицированных слоев и покрытий. Например, при изготовлении лопаток газовых турбин используются литейные жаропрочные никелевые сплавы с коррозионностойким и термобарьерным защитными покрытиями. Работоспособность покрытий, контактирующих непосредственно с рабочей средой, зависит от прочности сцепления сплавов с основой, структуры и рельефа покрытий. Для соединения литейных сплавов применя-

ют диффузионную сварку, в том числе с расплавляющимися прослойками. На работоспособность соединений и прочность сцепления покрытий с лопатками существенное влияние оказывает активация соединяемых и покрываемых поверхностей. Перспективным направлением повышения ресурса деталей является модифицирование и легирование их поверхностей с применением высококонцентрированных импульсных источников энергии [1–4]. В последние годы для модифицирования и легирования успешно используются низкоэнергетические сильноточные электронные пучки (НСЭП) и высокоэнергетические плазменные потоки (ВПП). Технологии модифицирования

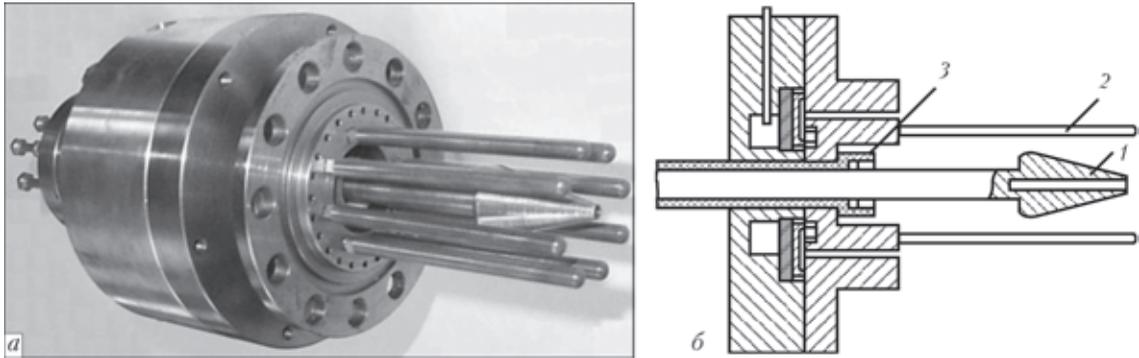


Рис. 1. Общий вид разрядного устройства МПККГ (а) и его схема (б): 1 — катод; 2 — стержневой анод; 3 — изолятор

и легирования поверхностей с применением высококонцентрированных источников энергии имеют общее название радиационно-пучковых технологий (РПТ) [1]. Благодаря применению РПТ обеспечивается изменение топографии поверхности, ее активация, повышение адгезионной способности, исправление поверхностных дефектов, требуемый химический состав, которые являются определяющими факторами в процессах нанесения покрытий и соединения металлов в твердом состоянии с использованием промежуточных прослоек, в том числе и расплавляющихся.

Цель настоящих исследований — определение закономерностей создания модифицированных прослоек на поверхностях материалов с применением НСЭП и ВПП, их влияние на строение и свойства покрытий, формирование соединений из сталей различных структурных классов и жаропрочных никелевых сплавов.

Обработку поверхностей НСЭП проводили на установке «СОЛО» Института сильноточной электроники СО РАН, устройство и принцип которой описаны в работе [2]. Модифицирование поверхностей велось в вакууме  $10^{-2}$  Па. Установка обеспечивает сверхбыстрый нагрев поверхности материалов ( $10^6 \dots 10^9$  °С/с) электронным пучком диаметром 10...30 мм при силе тока 20...200 А. Длительность импульса 50...150 мкс, частота импульсов 1...5 с<sup>-1</sup>. Ускорение электронов обеспечивается электрическим полем при напряжении 15...20 кВ.

Модифицирование ВПП осуществляли с использованием магнитоплазменного компрессора компактной геометрии (МПККГ) Белорусского государственного университета [3]. В МПККГ ускорение плазмы осуществляется в аксиально-симметричной системе двух электродов и сопровождается ее сжатием за счет взаимодействия продольной составляющей тока с собственным азимутальным магнитным полем (рис. 1). В результате на выходе из разрядного устройства формируется компрессионный плазменный поток длиной 10...12 см и диаметром до 20 мм в области максимального сжатия.

Сварку и пайку образцов с модифицированной поверхностью выполняли на установке для дуговой сварки УДСВ-ДТ в вакууме  $10^{-2}$  Па или сверхвысоковакуумном универсальном технологическом комплексе ВВУ-1Д в вакууме не хуже  $10^{-5}$  Па Национального университета кораблестроения им. Адмирала Макарова.

Путем варьирования расстояния от среза катода до обработанного изделия от 6 до 12 см плотность энергии при постоянном напряжении на конденсаторной батарее 3,0 кВ изменяется от 15 до 21 Дж/см<sup>2</sup> в одном импульсе. Длительность импульса составляет 100 мкс. Скорость охлаждения расплава  $10^6 \dots 10^9$  °С/с. В зависимости от материала подложки и покрытия модифицирование ВПП выполняли в среде азота или водорода при давлении рабочей среды  $3 \cdot 10^2$  Па. Перед заполнением газом камера вакууммируется.

Основным механизмом модифицирования поверхности является сверхбыстрая закалка, в том числе и с жидкого состояния, сопровождающаяся аморфизацией, формированием субмикроструктурной структуры, близкой к наноструктуре, дефектов кристаллической решетки, напряжений 3-го рода, изменением химического состава и др.

Исследования структуры модифицированной поверхности сталей и сплавов показали, что существенной разницы между обработкой НСЭП и ВПП по строению металла нет. На рис. 2 для сравнения показаны структуры основного металла и модифицированного слоя стали 10895, а также жаропрочного никелевого сплава ЧС88У-ВИ.

Анализ результатов исследований структуры и свойств модифицированных поверхностей исследуемых сталей и сплавов с применением НСЭП и ВПП показал, что они имеют ряд общих закономерностей: формирование субмикроструктурной структуры, повышение плотности дислокаций, наличие режимов обработки, обеспечивающих получение гладкой поверхности модифицированного слоя. Высокие дисперсность структуры (зерен и субзерен), плотность дислокаций и напряжений 3-го рода свидетельствуют о

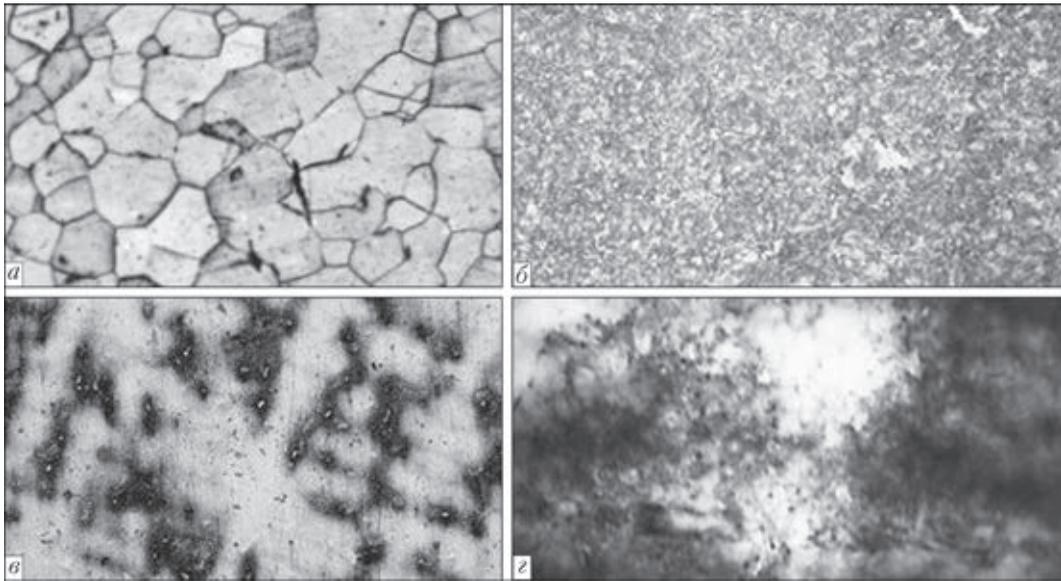


Рис. 2. Микроструктура стали 10895 (а,  $\times 160$ ) и модифицированного слоя (б,  $\times 250$ ); сплава ЧС88У-ВИ (в,  $\times 250$ ) и тонкая структура модифицированного слоя с использованием НСЭП этого же сплава (з,  $\times 30000$ )

высоком уровне энергии, аккумулируемой в модифицированном слое.

Исследованные материалы имеют также свои особенности, влияющие на результаты модифицирования. На стали 10895 (структура  $\alpha$ -Fe) получено наибольшее упрочнение поверхностного модифицированного слоя (повышение твердости на 74 %), на стали 12X18H10T (структура  $\gamma$ -Fe) — незначительное (повышение твердости на 12 %), на жаропрочном сплаве — микротвердость снизилась на 20 %. Поскольку фазовый состав сталей при модифицировании не изменяется, а дисперсность новой структуры обеих сталей примерно одинакова, то, вероятно, на степень упрочнения этих двух металлов влияет различие энергии дефектов упаковки, которая для стали 12X18H10T (до 40 мДж/м<sup>2</sup>) значительно меньше, чем для железа, содержащего несколько сотых процентов углерода (140...240 мДж/м<sup>2</sup>). При этом следует учитывать также то, что при закалке стали 12X18H10T уменьшается количество карбидов титана, влияющих на твердость и пластичность стали.

Снижение микротвердости жаропрочного дисперсионно-упрочняемого сплава после закалки с жидкого состояния, вероятно, обусловлено растворением упрочняющей  $\gamma'$ -фазы, которая выделяется не только в процессе выдержки сплава при температуре старения, но и при охлаждении отливки. Характерно, что на фоне общего повышения уровня наиболее высокие плотности дислокаций формируются по границам фазовых выделений, расположенных внутри матричных зерен. Возрастание напряжений в модифицированных поверхностных слоях подтверждает также вид микродифракционных отражений, имеющих азимутальное размытие рефлексов.

Исследование тонкой структуры сплава ЧС88У-ВИ показало, что как в основном металле, так и в модифицированном слое дисперсность упрочняющей фазы не одинакова на различных участках. В модифицированном слое возможны как коагуляция упрочняющей фазы, так и образование мелкодисперсных частиц с размерами 0,1 мкм под действием термического удара.

Влияние модифицированных поверхностей на формирование соединений исследовали путем диффузионной сварки следующих образцов: образцов, где обе соединяемые поверхности были модифицированы обработкой НСЭПР или ВПП; образцов, где обе поверхности, не подлежащие модифицированию, были зачищены перед сваркой мелкой абразивной бумагой, а также образцов, поверхность одного из которых была модифицирована, другого зачищена шлифовальной бумагой.

Исследования микроструктуры металла сварных соединений сплава ЧС88У-ВИ с обеими зачищенными абразивом поверхностями показали, что глубина зоны активного протекания процессов при соединении немодифицированных поверхностей мала и равняется 20...45 мкм по обе стороны от стыка. Вдоль стыка объемная доля рекристаллизованных зерен составляет около 10,0 %. Микротвердость металла по обе стороны стыка в среднем равняется 3860 МПа.

При соединении образцов сплава ЧС88У-ВИ с модифицированной и механически подготовленной поверхностями глубина зоны активных процессов рекристаллизации со стороны модифицированной поверхности возрастает до 80...120 мкм. Объемная доля рекристаллизованных зерен вдоль стыка со стороны модифицированной поверхности составляет 45 %, микротвердость равняется 4120...4410 МПа, размер зерна изменяется от 50 $\times$ 85 до 120 $\times$ 350 мкм. Объем-

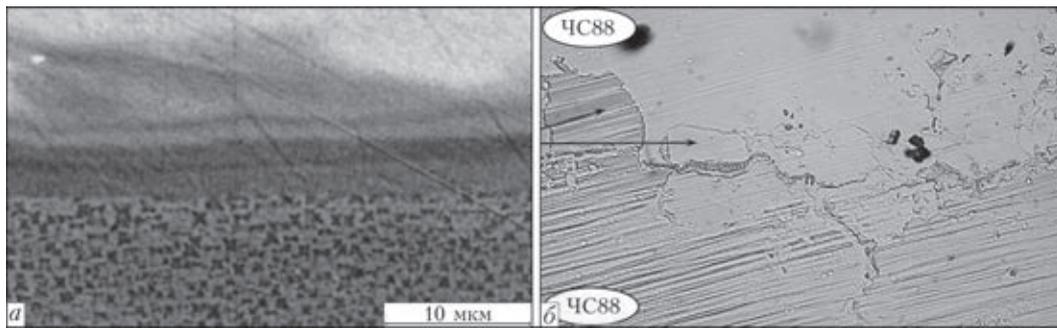


Рис. 3. Микроструктура модифицированного слоя сплава ЧС88У-ВИ (а) и сварного соединения (б,  $\times 500$ )

ная доля рекристаллизованных зерен с немодифицированной стороны составляет 10 %, микротвердость — 3910...4400 МПа, размер зерна изменяется от  $20 \times 40$  до  $40 \times 125$  мкм.

Особенностью структуры в зоне стыка модифицированной и немодифицированной поверхностей является наличие в стыке большого количества общих мелких зерен, которые хорошо видны при больших увеличениях при исследовании фольги на просвет.

Микроструктура модифицированного слоя и металла сварного соединения сплава ЧС88У-ВИ с обеими модифицированными поверхностями представлена на рис. 3. Размер зерна в зоне стыка находится в интервале от  $25 \times 50$  до  $100 \times 180$  мкм, глубина зоны интенсивной рекристаллизации равняется 100...170 мкм.

Сравнив структуру сварных соединений в зоне стыка сплава ЧС88У-ВИ, следует отметить, что рекристаллизация металла более интенсивно и полно проходит в зоне модифицирования. Разрушение сварных соединений происходит по основному металлу. Приведенные результаты получены диффузионной сваркой при температуре  $1150^\circ\text{C}$  и давлении 20 МПа с выдержкой 3 мин, что существенно ниже параметров режима, рекомендованных для жаропрочных сплавов в работах [5, 6]. Например, для дисперсионно-упрочняемого сплава ЭП99 оптимальными рекомендованы  $T_{\text{св}} = 1150...1175^\circ\text{C}$ ,  $p = 40...35$  МПа,  $t_{\text{св}} = 6$  мин, для аустенитного сплава ЭИ602 —  $T_{\text{св}} = 1150...1175^\circ\text{C}$ ,  $p = 30...25$  МПа, для сплава ВЖ98 —  $T_{\text{св}} = 1175...1200^\circ\text{C}$ ,  $p = 20...25$  МПа,  $t_{\text{св}} = 30$  мин.

Характерной особенностью обработки НСЭП и ВПП дисперсионно-твердеющих жаропрочных

никелевых сплавов является образование трещин, количество и размеры которых зависят от плотности энергии и изменяются от микро- до макро-размеров. Вероятно, это связано с низкой технологической прочностью сплавов, определяющей стойкость к образованию горячих трещин при сварке плавлением. Повышению стойкости против горячих трещин способствует снижение погонной энергии сварки. При понижении плотности энергии и увеличении количества импульсов количество трещин уменьшается, а при плотности энергии  $15 \text{ Дж/см}^2$  их удается избежать, но даже при наличии трещин после модифицирования в сварном соединении они отсутствуют [7].

В ходе исследований влияния обработки ВПП поверхностей предварительно нанесенных плазменных покрытий установлено, что для модифицирования коррозионностойкого подслоя (СДП-8) может быть рекомендована плотность энергии  $15...21 \text{ Дж/см}^2$ , а для термобарьерного ( $\text{ZrO}_2$  стабилизированный  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) она должна быть не более  $15 \text{ Дж/см}^2$ . При этом наблюдается сглаживание рельефа (рис. 4, а, б) и уплотнение тонкого до 10 мкм поверхностного слоя, что способствует повышению эрозионной стойкости покрытия в процессе эксплуатации.

Исследования состава модифицированного слоя сталей рентгеноспектральным анализом с поверхности показали, что его химический состав близок составу основного металла. Обработка термобарьерных покрытий ВПП в среде  $\text{H}_2$  приводит к образованию блестящего поверхностного слоя, а в среде  $\text{N}_2$  — к образованию нитридов.

Поверхности сплава ЧС88У-ВИ легировали элементами, снижающими температуру плавления поверхностного слоя. Известно [8–11], что

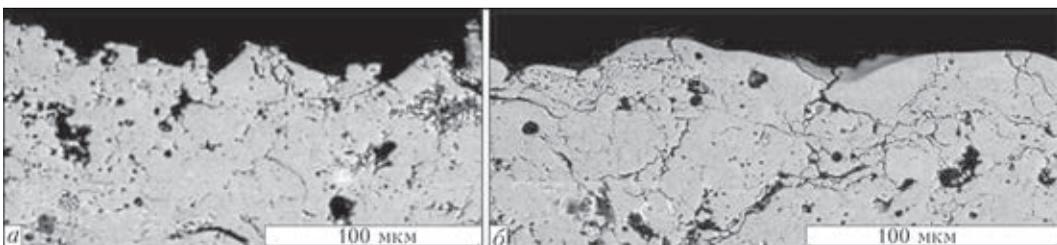


Рис. 4. Микроструктура термобарьерного плазменного покрытия до (а) и после обработки ВПП (б)

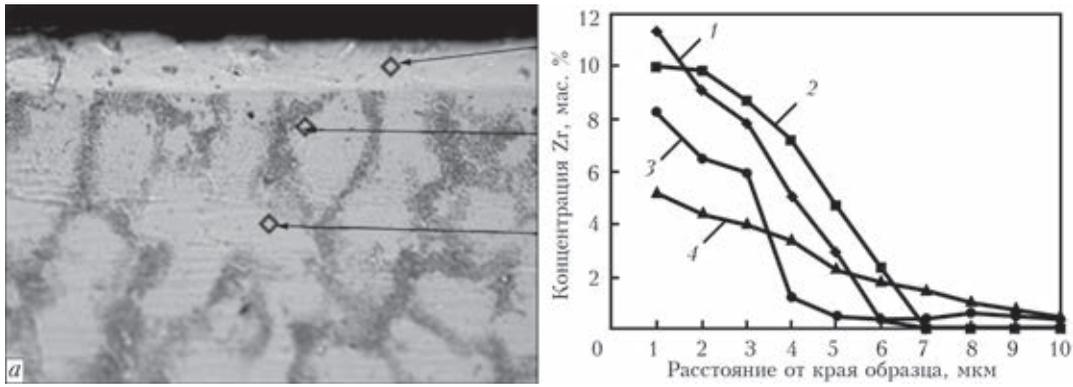


Рис. 5. Микроструктура (а,  $\times 500$ ) легированного цирконием поверхностного слоя сплава ЧС88У-ВИ и распределение концентрации циркония (б) при различных режимах обработки ВПП (1–4)

припои с цирконием и гафнием при сравнительно низких концентрациях не оказывают отрицательного влияния на свойства жаропрочных никелевых сплавов и обеспечивают высокие механические свойства соединений. В сплавах типа ЧС70 цирконий незначительно снижает, а гафний повышает стойкость против высокотемпературной солевой коррозии.

Исследования модифицированных поверхностей показали, что формирование оплавленного слоя в первую очередь зависит от толщины напыленного слоя легирующего элемента, плотности энергии, количества импульсов. Микроструктура модифицированного слоя и распределение легирующего элемента в слое при разных режимах обработки показаны на рис. 5.

При одной и той же толщине напыленного слоя легирующего элемента и возрастании количества импульсов увеличивается равномерность

распределения циркония и гафния, но уменьшается их концентрация на поверхности слоя. Как видно из рис. 5, концентрация циркония у поверхности близка к эвтектической только у кривых 1 и 2. Вместе с тем известно [8, 12], что в никелевых сплавах эвтектическая концентрация гафния несколько снижается по сравнению с системой Ni–Hf. При высоких скоростях охлаждения ( $10^4 \dots 10^5$ ) °C/c эквивалентная концентрация гафния расширяется, а температура плавления снижается до 1178 °C. Кроме того, установлено, что расплавы, заполняющие междендритные капилляры сверхпрочных никелевых сплавов даже при содержании гафния 16 мас. %, представляют собой эвтектику  $Ni_{дер} - Ni_5Hf$  [13]. Аналогичный эффект может быть также в системе  $Ni_{дер} - Zr$ . Во всяком случае при температуре 1200 °C жидкости в стыке достаточно даже для образования галтелей.

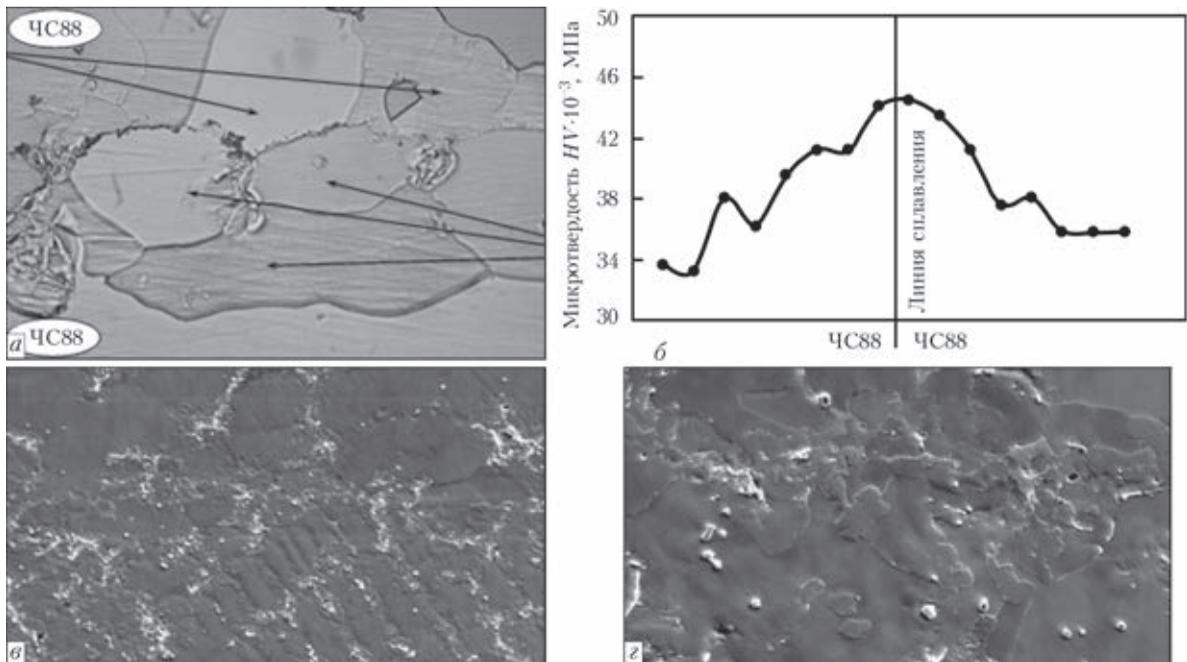


Рис. 6. Микроструктура соединения с легированными цирконием поверхностями сплава ЧС88У-ВИ при пайке с давлением (а,  $\times 500$ ); интегральное распределение микротвердости (б); микроструктура соединений с легированными гафнием (в,  $\times 150$ ) и цирконием (г,  $\times 300$ ) поверхностями после термической обработки

При давлении сжатия 10...15 МПа в соединении сплавов ЧС88У-ВИ на микроструктуре стык не выявляется (рис. 6, а). Распределение микротвердости в зоне соединения показано на рис. 6, б, а структура сварных соединений с легированными гафнием и цирконием поверхностями после термической обработки — на рис. 6, в, г.

Исследования структуры соединений сплава ЧС88У-ВИ показали, что в зоне стыка формируется структура, аналогичная структуре основного металла. Механические испытания подтвердили высокое качество соединений как при модифицированных, так и легированных поверхностях. Прочность соединений на растяжение при 900 °С не ниже 90 % прочности основного металла.

Аналогичные результаты получены при соединении с легированными поверхностями сплава Inconel 718. Предел прочности соединений при температуре испытаний 550 °С превышал 900 МПа, что больше 90 % прочности основного металла, а при испытании на долговечность при 785 °С, нормативных напряжениях и длительности сварные образцы сняты без разрушения.

Таким образом, обработка поверхности материалов НСЭП и ВПП обеспечивает формирование необходимых топографии, структуры, химического и фазового состава поверхностных слоев, являющихся основными факторами создания качественных соединений при дуговой сварке и нанесении покрытий.

Модифицированные НСЭП и ВПП слои характеризуются высокой плотностью дислокаций (до  $10^{11}$  см<sup>-2</sup>), повышенным уровнем напряжений 3-го рода, а также высоким уровнем межзеренной энергии, что оказывает положительное влияние на формирование соединений при дуговой сварке и нанесении плазменных покрытий. Сглаживание поверхности и уплотнение структуры модифицированного ВПП слоя термобарьерных покрытий способствует повышению их эрозионной стойкости в процессе эксплуатации.

Применение РПТ является перспективным направлением развития диффузионной сварки, пайки и нанесения покрытий.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов Украинского государственного фонда фундаментальных исследо-*

*ваний (Ф 28/429, Ф 41/191), Российского фонда (Укр\_ф\_а 09-02-90456), Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Ф11К-049).*

1. *Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов: Учебник / В. Г. Грибков, Ф. И. Григорьев, Б. А. Калинин, В. Л. Якушин; под ред. Б. А. Калина. — М.: Круглый год, 2001. — 528 с.*
2. *A high-current electron beam application for the surface modification of iron. Stainless steel and heat resistant alloys / V. V. Kvasnitskii, V. D. Kuznetsov, N. N. Koval et al. // Surface Eng. and Applied Electrochem. — 2009. — 45, № 3. — P. 180–185.*
3. *Влияние модифицирования поверхностей с применением концентрированных пучков энергии на формирование соединений в твердой фазе / В. Ф. Квасницкий, В. В. Квасницкий, Н. Н. Черенда и др. // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы 9-й Междунар. конф., Минск, 20 авг. — 2 сент. 2011. — Минск: Издательский центр БГУ, 2011. — С. 228–230.*
4. *Сильноточные импульсные электронные пучки для авиационного двигателестроения / А. Б. Белов, О. А. Бриценко, А. В. Крайников и др. — М.: ДИПАК, 2012. — 292 с.*
5. *Мусин Р. А., Анциферов В. Н., Квасницкий В. Ф. Диффузионная сварка жаропрочных сплавов. — М.: Металлургия, 1979. — 208 с.*
6. *Диффузионная сварка в вакууме дисперсионно-твердеющих жаропрочных сплавов с прокладками / Г. В. Ермолаев, Н. П. Житников, В. М. Заболотский и др. // Судостроит. пром-сть. Сварка. — 1988. — Вып. 6. — С. 13–23.*
7. *Элементный состав поверхностного слоя жаропрочного никелевого сплава, легированного атомами циркония под действием компрессионных плазменных потоков / Н. Н. Черенда, В. В. Углов, В. В. Квасницкий, В. Ф. Квасницкий // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. — 2014. — № 2. — С. 74–79.*
8. *Хорунов В. Ф., Иванченко В. Г., Квасницкий В. В. Структура и фазовый состав Ni–Cr–Zr и Ni–Cr–Hf сплавов, используемых в качестве припоев // Автомат. сварка. — 1999. — № 11. — С. 14–21.*
9. *Квасницкий В. Ф., Костин А. М., Квасницкий В. В. Влияние элементов-депрессантов на свойства никелевых припоев и жаропрочных сплавов // Адгезия расплавов и пайка материалов. — 2002. — № 35. — С. 129–139.*
10. *Evaluierung des Einsatzpotential und rostfreien Edelstahl / E. Lugscheider, I. Bushke, D. M. Daichend, Ch. M. Park // Hart- und Hochtemperaturloten und Diffusions schweissen. Vortage und posterbeiträge des 5. Intern. Kolloquiums in Aachen von 16. bis 18. juni 1998: DVS – Berichte Band 192. — Dusseldorf: Verl. Fur Schweissen und Verwandte Verfahren, DVS–Verl., 1998. — S. 242–245.*
11. *Investigation of effect mechanism of hafnium and zirconium in high temperature materials / Zeng Yun-Rong, Ca Yu-Lin, Ruan Zong-Ci, Ma Shu-Wei // J. Aeronautical Mat. — Beijing: BIAM AVIC. — 2006. — 26, № 3. — P. 25–34.*
12. *Sircars S., Mazumder J. Microstructure evolution and nonequilibrium phase diagram Ni–Hf binary alloy produced by baser clodding // Acta Metallurgica. — 1989. — 37, № 1. — P. 1167–1176.*
13. *Zehg Y., Ruan Z. Microstructure and performance of Ni–Hf brazing filler alloy // Acta Metal. Sinica. — 1990. — № 10. — P. 335–340.*

Поступила в редакцию 30.05.2014

# НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ СИЛОВОМ И ТЕМПЕРАТУРНОМ НАГРУЖЕНИИ УЗЛОВ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ С МЯГКОЙ ПРОСЛОЙКОЙ

И. А. КОЛЕСАР, Г. В. ЕРМОЛАЕВ

Нац. ун-т кораблестроения им. Адмирала Макарова. 54025, г. Николаев, просп. Героев Сталинграда, 9.  
E-mail: welding@nuos.edu.ua

С целью оптимизации процесса диффузионной сварки и пайки узлов из разнородных материалов с мягкими прослойками исследовано напряженно-деформированное состояние (НДС) при нагружении сжатием и изменением температуры. Соединяли материалы, которые имели отличающиеся термические коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) и одинаковые модули упругости. Примером таких соединений могут быть соединения магнитных и немагнитных сталей, полученных с применением диффузионной сварки с мягкими прослойками или пайкой давлением с использованием припоев на основе меди с добавками кремния, марганца, бора. Достаточная прочность материалов в паяном узле сочетается с пластическим деформированием только прослойки. Изучены поля всех составляющих напряжений и деформаций, а также их эпюры в различных сечениях узлов. Анализ результатов моделирования показал, что касательные и эквивалентные напряжения в зоне стыка (на поверхности раздела), определяющие образование физического контакта и активацию процесса образования соединения при диффузионной сварке, при совместном нагружении узлов с мягкой прослойкой заметно увеличиваются в материале с большим ТКЛР при охлаждении и материале с меньшим ТКЛР при нагреве. При этом распределение пластических деформаций в прослойке более равномерно, т. е. термоциклирование под давлением способствует образованию физического контакта и активации процессов формирования соединения в таких узлах. Библиогр. 8, рис. 10.

*Ключевые слова:* диффузионная сварка, пайка, разнородные материалы, мягкие прослойки, моделирование НДС, температурное и силовое нагружение

Диффузионная сварка (ДС) и пайка являются основными способами соединения многих материалов, которые не подлежат сварке плавлением в связи с потерей структуры и свойств.

Одной из важных проблем соединения разнородных материалов этими методами является пластическая деформация и активация поверхности более прочного материала. Для решения существующих проблем применяют ДС с промежуточными прокладками и с управляемым напряженно-деформированным состоянием (НДС) [1]. В случае применения пайки промежуточной прокладкой часто является сам припой, который может иметь разные физико-механические свойства (ФМС) как до пайки, так и после взаимодействия с основным материалом.

В последние годы уделяется большое внимание исследованию НДС при ДС и пайке узлов из разнородных материалов [2–7], поэтому исследование влияния соотношений прочности соединяемых материалов и прослойки на НДС узлов и установление общих закономерностей актуально.

Цель настоящей работы – установление влияния низкой прочности материала промежуточных прокладок (прослоек) по сравнению с соединяемыми материалами (мягкие прослойки) и форми-

рование НДС как в процессе ДС, так и при остывании после сварки и пайки.

Исследования проводили методом компьютерного моделирования с использованием лицензионного программного комплекса ANSYS (10 версии). Решали осесимметричные задачи с использованием конечных элементов (КЭ) типа PLANE 182. Адекватность результатов моделирования ранее проверена экспериментально [8].

Исследовали типы узлов, которые наиболее часто встречаются при ДС и пайке: втулка-втулка (В-В) и цилиндр-цилиндр (Ц-Ц). Последний тип узла можно рассматривать как частный случай первого, когда обращается в нуль внутренний диаметр. Общий вид физических и КЭ моделей показан на рис. 1. Толщину прослойки принимали равной 1 мм, общую высоту всех узлов  $2h = 20$  мм, радиус цилиндра и толщину втулки 10 мм.

Исследование выполняли на узлах из материалов одинаковой жесткости (модуль упругости  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа) и прочности (предел текучести  $\sigma_T \geq 200$  МПа) с прослойками такой же жесткости, но меньшей, чем у основных материалов, прочности  $\sigma_T = 38$  МПа). Для материала 1 термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР)  $\alpha \cdot 10^6 = 20$  град<sup>-1</sup>; для материала 2 — 10; прослойки — 15. ФМС материалов и уровень нагрузок подбирали так, чтобы пластически деформировал-

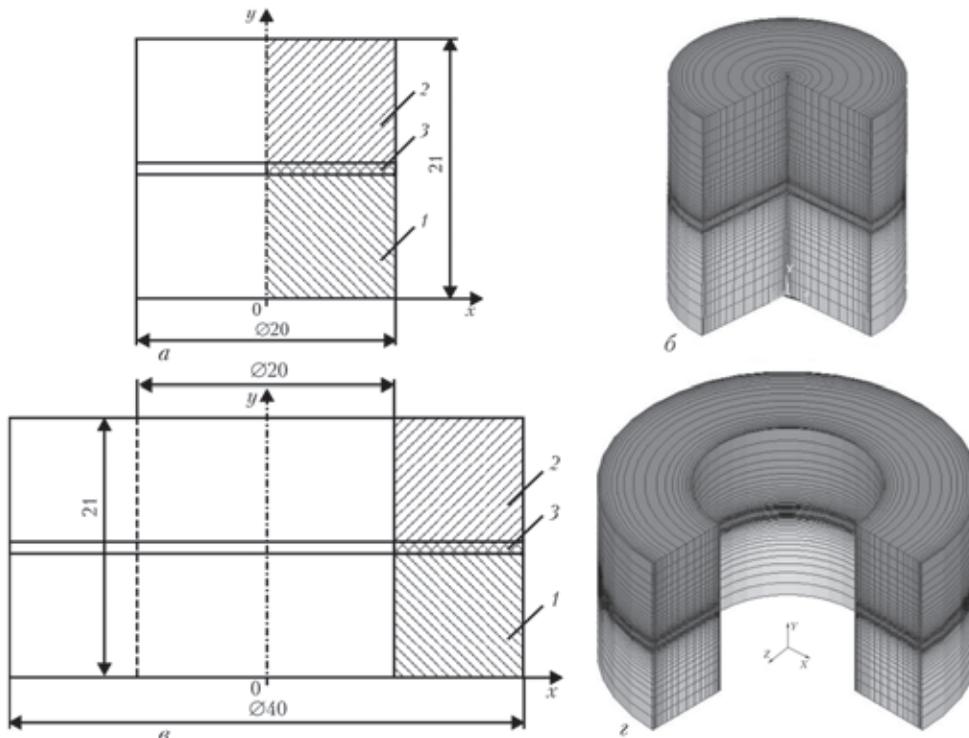


Рис. 1. Физические (а, в) и КЭ (б, з) модели узлов типа Ц-Ц (а, б) и В-В (в, з) с прослойкой (1–3 — соответственно материал 1, материал 2 и прослойка)

ся только материал прослойки, при этом деформирование охватывало большую часть прослойки.

Рассматривалось силовое (сжатие 40 МПа), температурное (охлаждение на 100 °С, когда НДС создается за счет отличия ТКЛР соединяемых материалов) и совместное температурно-силовое нагружение узла (после образования соединения). Очевидно, что полученные при таком нагружении результаты имеют место и при смене охлаждения нагревом (при сварке с термоциклированием), но материалы 1 и 2, имеющие разные ТКЛР, при этом поменяются местами. Результаты моделирования сравнивали с аналогичными узлами при разных видах нагружения и между собой.

Анализировали поля и эпюры всех составляющих напряжений и пластических деформаций

узлов. Как показал анализ результатов моделирования в узлах Ц-Ц и В-В характер НДС в целом соответствует общим принципам механики и закономерностям, установленным ранее [2, 5–7], при этом НДС узлов Ц-Ц и В-В отличается только вблизи внутренней поверхности втулки, которая отсутствует в узлах Ц-Ц. Поэтому на рис. 2–4 приводятся только поля в узлах В-В.

В области прослойки создается объемное напряженное состояние, наиболее выраженное при температурном и совместном температурно-силовом нагружениях. При чисто силовом нагружении напряженное состояние меняется незначительно, оставаясь близким к линейному.

В узлах обоих типов эффекты температурного и силового нагружения алгебраически суммируются, в результате чего поля радиальных и окружных напряжений остаются практически такими же, как при чисто температурном нагружении. Осевые сжимающие напряжения в материале 1 увеличиваются, а растягивающие в материале 2 уменьшаются на величину сжимающей нагрузки (рис. 2).

Касательные напряжения заметно увеличиваются на границе раздела мягкой прослойки и ма-

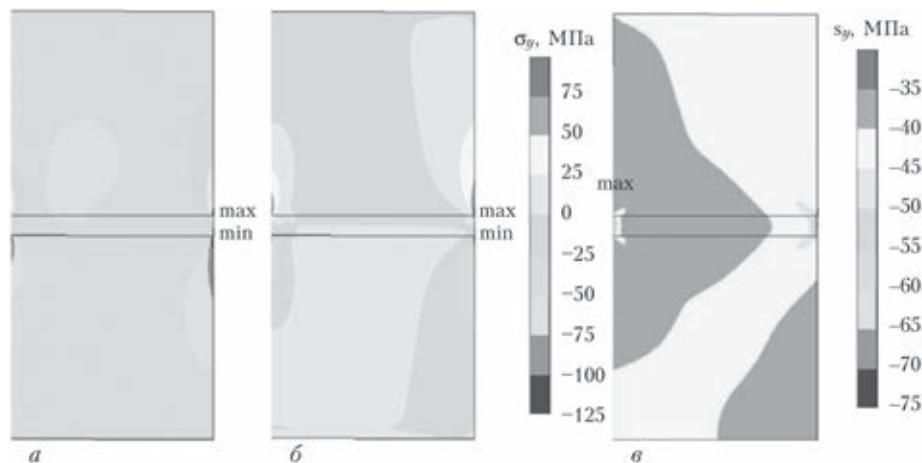


Рис. 2. Поля осевых напряжений в узлах В-В с мягкой прослойкой при температурно-силовом (а), температурном (б) и силовом (в) нагружении

териала 1 и уменьшаются на границе раздела с материалом 2 (рис. 3) по сравнению с чисто температурным нагружением. Здесь наглядно проявляется алгебраическое суммирование эффектов от разности ТКЛР и пластического деформирования прослойки.

Аналогично изменяется и поле эквивалентных напряжений (рис. 4). Последние при совместном нагружении заметно увеличиваются в материале 1 и уменьшаются в материале 2 по сравнению с чисто температурным нагружением.

В соответствии с эквивалентными напряжениями изменяется и поле пластических деформаций (рис. 5). Как и при чисто температурном нагружении максимум последних сосредоточен вблизи внешней поверхности узла, но заметно изменяется их распределение по толщине прослойки. Они максимальны на границе раздела с материалом 1 и уменьшаются по мере удаления от нее.

Характер эпюр распределения радиальных, окружных и касательных напряжений в соединяемых материалах при совместном температурном и силовом нагружении совпадает с характером соответствующих эпюр при чисто температурном нагружении. При этом максимальные радиальные напряжения в соединяемых материалах снижаются на 15...20 МПа, а окружные на 10...15 МПа. Эпюры осевых напряжений смещаются в сторону сжатия на 40 МПа (рис. 6).

Максимальные касательные напряжения вблизи внешней цилиндрической поверхности увеличиваются со стороны материала 1 на 10 МПа (рис. 7, а) и уменьшаются на 10 МПа со стороны материала 2 (рис. 7, б).

Соответственно изменяются и эпюры эквивалентных напряжений. Уровень этих напряжений растет на величину приложенного давления 40 МПа в материале 1 и снижается на 40 МПа в материале 2 (рис. 8). Распределение их в обо-

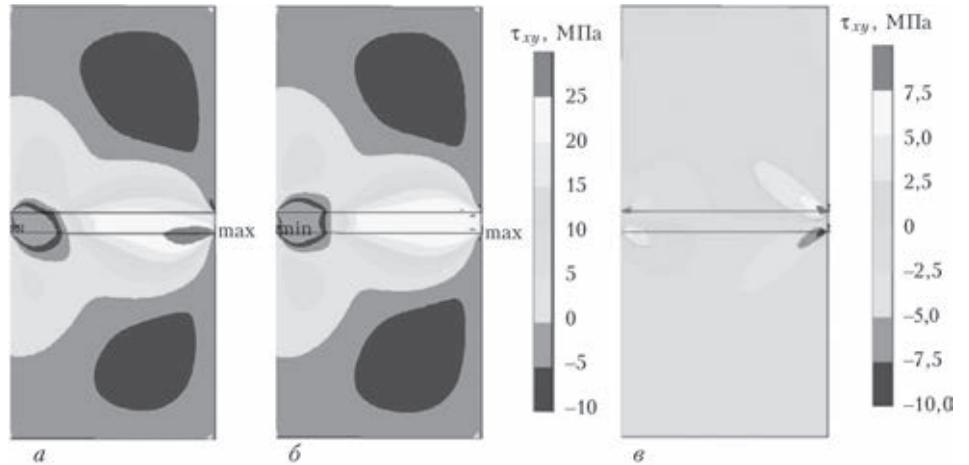


Рис. 3. Поля касательных напряжений в узлах В-В с мягкой прослойкой при температурно-силовом (а), температурном (б) и силовом (в) нагружении

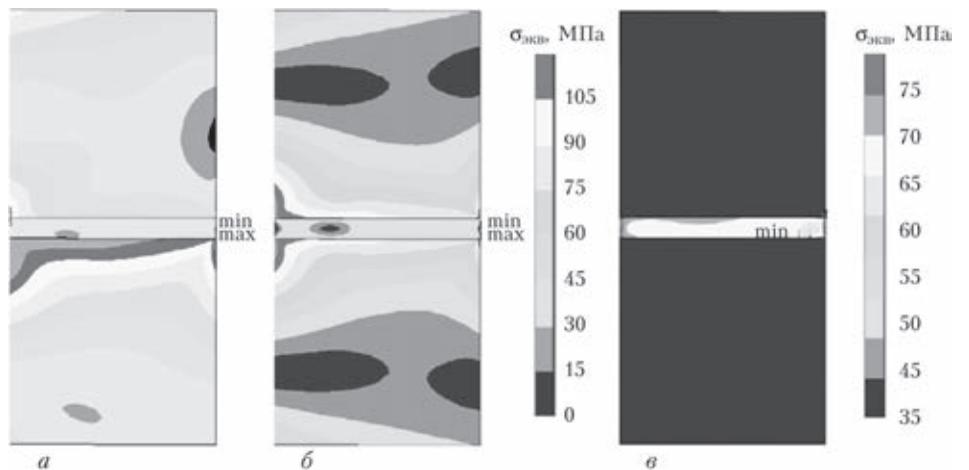


Рис. 4. Поля эквивалентных напряжений в узлах В-В с мягкой прослойкой при температурно-силовом (а), температурном (б) и силовом (в) нагружении

их соединяемых материалах остается близким к равномерному.

В материале мягкой прослойки, деформирующемся пластически, величина эквивалентных напряжений на большей части стыка остается на уровне около 40 МПа со стороны материала 2. Со стороны материала 1 распределение неравномерное, имеются четко выраженные зоны застоя (вблизи оси узлов Ц-Ц и на 1/3 толщины от внутренней поверхности узлов В-В), в которых эквивалентные напряжения снижаются до 10...25 МПа. Вблизи внешней поверхности узлов они напротив увеличиваются за счет наклепа при больших пластических деформациях.

Анализ эпюр пластических деформаций в материале мягкой прослойки также показывает, что они распределены неравномерно, постепенно увеличиваясь от близких к 0 в зоне застоя до 1 % и более вблизи наружной поверхности. При этом на границе с материалом 1 в этой зоне при совместном нагружении они в несколько раз больше, чем при чисто температурном нагружении (рис. 9, а). На границе с материалом 2, напротив, распределение более равно-

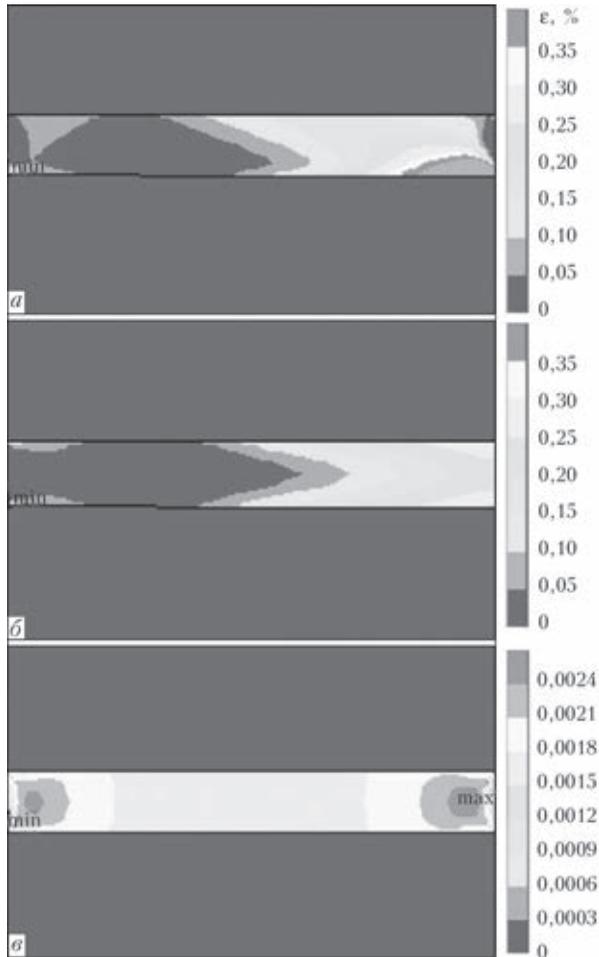


Рис. 5. Поля пластических деформаций в мягкой прослойке узлов В-В при температурно-силовом (а), температурном (б) и силовом (в) нагружении

мерное, чем при чисто температурном нагружении (рис. 9, б), но уровень их ниже.

Таким образом, совместное силовое (сжатие) и температурное (охлаждение) нагружение соз-

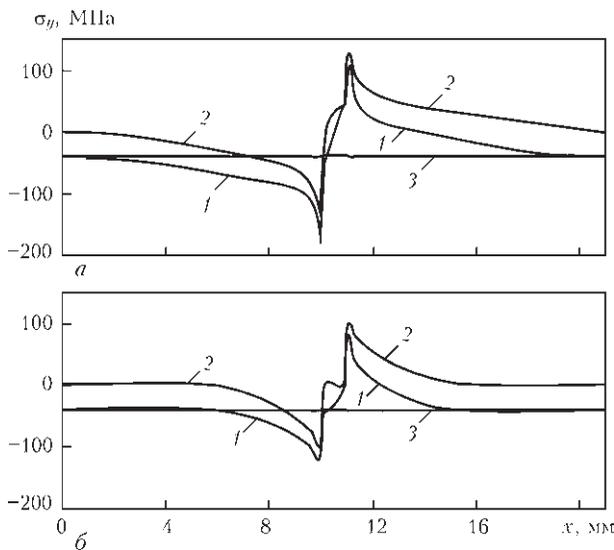


Рис. 6. Эпюры осевых напряжений вдоль внешней (а) и внутренней (б) поверхностей узла В-В с мягкой прослойкой при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

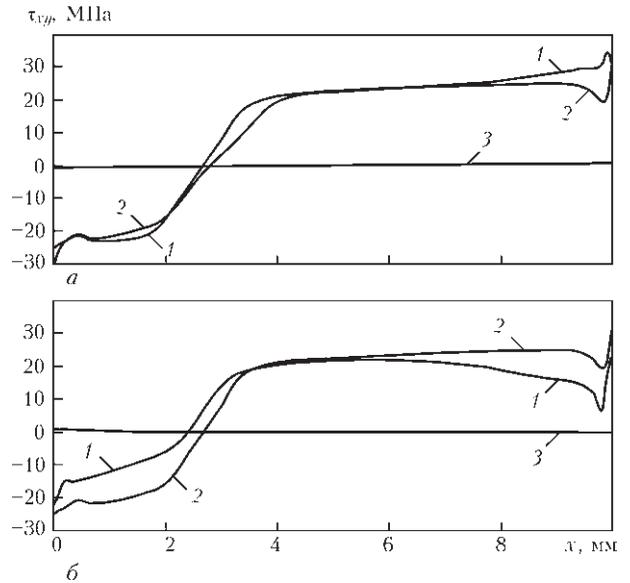


Рис. 7. Эпюры касательных напряжений по стыкам соединяемых материалов 1 (а) и 2 (б) с прослойкой в узлах В-В при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

дает более благоприятные условия для развития пластических деформаций в мягкой прослойке, чем чисто термическое. Со стороны материала 1 (с большим ТКЛР) увеличивается их уровень и неравномерность распределения, со стороны материала 2 (с меньшим ТКЛР) они уменьшаются, но распределение становится более равномерным. Очевидно, что при смене охлаждения нагревом материалы меняются местами, т. е. термоциклирование под давлением должно способствовать образованию физического контакта и активации процессов формирования соединения.

Для удобства сравнения на рис. 10 приведены диаграммы максимальных по модулю напряжений

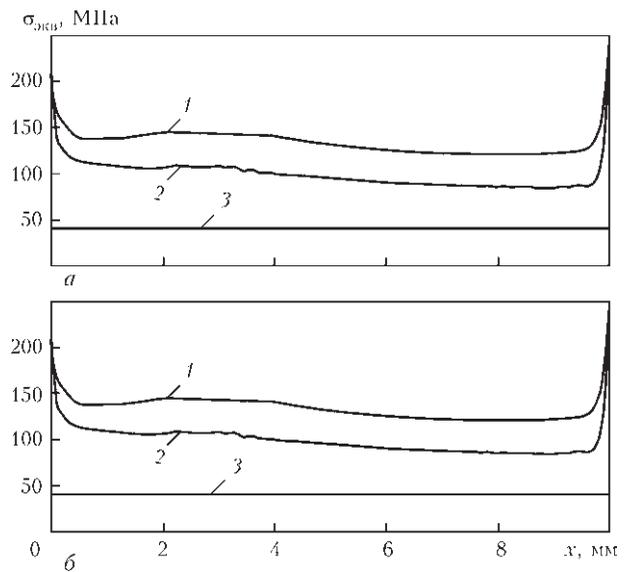


Рис. 8. Эпюры эквивалентных напряжений в соединяемых материалах 1 (а) и 2 (б) по стыкам с прослойкой в узлах В-В при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

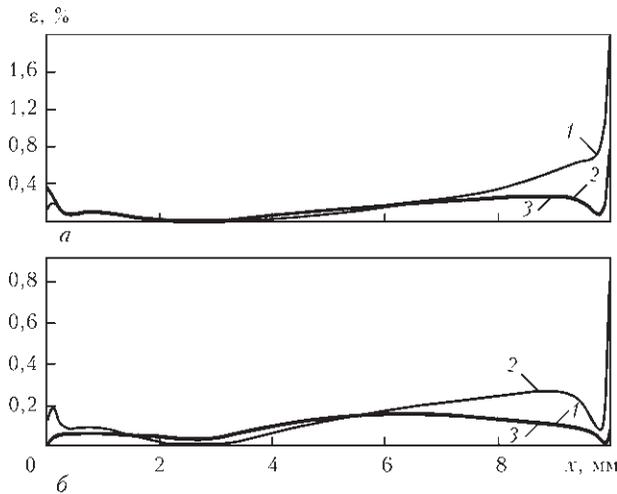


Рис. 9. Эпюры пластических деформаций в материале прослойки на стыке с соединяемыми материалами 1 (а) и 2 (б) в узлах В-В при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

в соединяемых материалах и прослойке при разных вариантах нагружения.

Анализ диаграмм подтверждает, что эффект совместного температурного и силового нагружения узлов с мягкими прослойками проявляется в некотором увеличении радиальных и тангенциальных напряжений во всех материалах, увеличении эквивалентных в материале 1 и прослойке и осевых в соединяемых материалах и, соответственно, уменьшении эквивалентных в материале 2 и осевых в материале прослойки, касательные напряжения при этом остаются практически такими же, как при чисто температурном нагружении.

### Выводы

1. Касательные и эквивалентные напряжения в зоне стыка (на поверхности раздела), определяющие образование физического контакта и активацию процесса образования соединения при диффузионной сварке, при совместном нагружении узлов с мягкой прослойкой заметно увеличиваются в материале с большим ТКЛР при охлаждении и материале с меньшим ТКЛР при нагреве. При этом распределение эквивалентных напряжений близко к равномерному, т. е. термоциклирование под давлением должно способствовать образованию физического контакта и активации процессов формирования соединения в узлах с мягкой прослойкой.

2. Пластические деформации в материале мягкой прослойки на границе с материалом с меньшим ТКЛР при совместном нагружении сжатием и охлаждением распределены более равномерно, но уровень их ниже, чем при чисто температурном нагружении. При совместном сжатии и нагреве то же происходит на границе с материалом

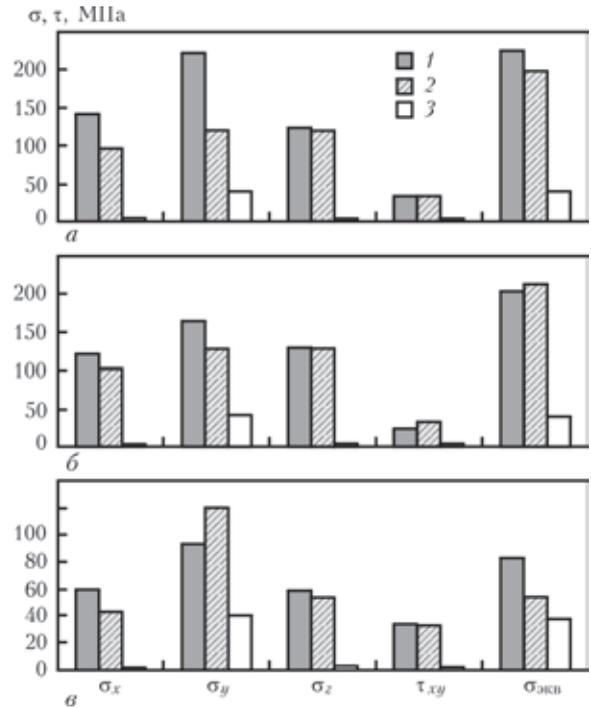


Рис. 10. Максимальные (по модулю) напряжения в материале 1 (а), 2 (б) и мягкой прослойки (в) узлов В-В при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении с большим ТКЛР, т. е. сварка с термоциклированием под давлением в узлах с мягкой прослойкой обеспечивает более равномерное распределение пластических деформаций в прослойке.

1. Пат. 81583 Україна, МПК В23К 20/14. Спосіб дифузійного зварювання матеріалів / В. В. Квасницький, М. В. Матвієнко, Г. В. Єрмолаєв та ін. – Нац. ун-т кораблебудування ім. Адмірала Макарова. – Заявл. 21.11.2006. Опубл. 10.01.2008. Бюл. 1.
2. Квасницький В. В., Ермолаєв Г. В., Матвієнко М. В. Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке разнородных материалов применительно к узлам цилиндр-цилиндр и втулка-втулка // 36. наук. праць НУК. – 2007. – № 5. – С. 57–65.
3. Zhong Z., Zhou Z., Ge C. Residual stress distribution and effect of interlayer in doped graphite/copper joints // Welding Technology. – 2004. – № 6. – P. 14–16.
4. Zhong Z., Zhou Z., Ge C. Brazing of doped graphite to Cu using stress relief interlayers // J. Materials Processing Technology. – 2009. – 209. – P. 2662–2670.
5. Махненко В. И., Квасницький В. В. Напряженно-деформированное состояние узлов цилиндрической формы при диффузионной сварке // Автомат. сварка. – 2009. – № 2. – С. 5–10.
6. Махненко В. И., Квасницький В. В. Особенности формирования напряженно-деформированного состояния соединений разнородных материалов, полученных диффузионной сваркой // Там же. – 2009. – № 8. – С. 11–16.
7. Квасницький В. В., Ермолаєв Г. В., Колесар І. А. Напряженно-деформований стан зварних та спаяних з'єднань різнорідних матеріалів однакової жорсткості з проміжними прошарками // 36. наук. праць НУК. – 2011. – № 5. – С. 36–43.
8. Экспериментальное исследование деформации сварного узла типа втулка-втулка из разнородных материалов / В. В. Квасницький, Ю.Г. Золотой, А. В. Лабарткава и др. // 36. наук. праць НУК. – 2008. – № 4. – С. 65–73.

Поступила в редакцию 30.05.2014

## ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ВЫПУКЛОСТИ ШВА НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СТЫКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Г. В. ЕРМОЛАЕВ, В. А. МАРТЫНЕНКО, И. В. МАРУНИЧ

Нац. ун-т кораблестроения им. Адмирала Макарова. 54025, г. Николаев, просп. Героев Сталинграда, 9.

E-mail: welding@nuos.edu.ua

С целью выяснения возможности компенсации пониженной прочности металла шва увеличением размеров выпуклости стыкового соединения и установления зависимости необходимой высоты выпуклости от соотношения прочности шва и основного металла проведено исследование уровня и характера распределения напряжений в стыковых соединениях при нагружении их растяжением при различных размерах выпуклости. Исследования проводили методом компьютерного моделирования на стыковых соединениях видов С25 и С21. Варьировались высота и ширина выпуклости при постоянной толщине основного металла. Форма выпуклости принималась в виде дуги. Изучали поля всех составляющих напряжений, а также их эпюры в различных сечениях шва. Полученные величины коэффициентов концентрации (1,8...2,3) при изменении размеров выпуклости в довольно широких пределах подтвердили адекватность моделирования. Вместе с тем показано, что наличие выпуклости в симметричном соединении вида С25 несколько снижает уровень максимальных растягивающих и эквивалентных напряжений внутри металла шва, что дает возможность компенсировать снижение его прочности по сравнению с основным металлом, но это снижение непропорционально увеличению площади сечения. Получено выражение, позволяющее рассчитать необходимую величину выпуклости в соединении в С25 вида при известной степени снижения прочности наплавленного металла по сравнению с основным. Наличие выпуклостей и их размер в несимметричном соединении вида С21 практически не влияет на уровень максимальных эквивалентных напряжений в сечении по оси шва, поэтому компенсировать пониженную прочность металла шва увеличением выпуклостей в таком соединении невозможно. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании стыковых соединений материалов, в частности, для соединений высокопрочных сталей, выполняемых аустенитными материалами, для которых существует проблема обеспечения равнопрочности металла шва и основного металла. Библиогр. 12, табл. 4, рис. 7.

*Ключевые слова:* стыковые соединения, распределение напряжений, размеры выпуклости, статическое нагружение

Классическая форма поперечного сечения стыкового соединения, выполненного дуговыми методами сварки, предполагает наличие выпуклости шва, размеры которой регламентируются всеми стандартами на сварные соединения [1–3]. Долгое время эту выпуклость называли усилением шва, так как предполагалось, что увеличение толщины металла на оси шва может компенсировать возможное снижение его прочности по сравнению с основным металлом.

С развитием и совершенствованием технологии сварки и сварочных материалов получение металла шва, равнопрочного основному, для большинства материалов, применяемых в сварных конструкциях, перестало быть проблемой. Соответственно и требования к размерам выпуклости шва в большинстве случаев остались чисто символическими. В ныне действующих межгосударственных стандартах (ГОСТ) высота выпуклости практически для всех толщин установлена в интервале от 1,5 до 4 мм при ширине от 5...6 до 60 мм [1–3].

Однако для некоторых материалов, например, высокопрочных сталей, проблема получения швов, равнопрочных с основным металлом, остается актуальной и в настоящее время. При невозможности получения равнопрочного металла шва, например, при использовании сварочных материалов аустенитного класса, приходится идти по пути снижения допускаемой нагрузки или напряжений в нем за счет увеличения высоты выпуклости. Именно последнее предусматривается соответствующими техническими требованиями к сварным стыковым соединениям высокопрочных сталей, применяемых при постройке корпусов военных кораблей и подводных лодок. Но при этом возникает другая проблема — концентрация напряжений в точке перехода от основного металла к металлу шва. Возможно поэтому в ныне действующих стандартах на сварочную терминологию термин «усиление» отнесен к недопустимым и заменен термином «выпуклость» [4, 5].

Анализ напряженного состояния соединения при нагружении растяжением методами теории упругости [6, 7] показал, что при наличии выпу-

Таблица 1. Варианты исследованных моделей соединений вида С25

Номер варианта	Высота выпуклости $a$ , мм	Ширина выпуклости $b$ , мм	Относительная высота $a/b$	Относительная ширина $b/s$	Полное сечение $s+2a$	Коэффициент усиления $(s+2a)/s$
1	2,5	23	0,11	0,77	35	1,17
2	4,5	43	0,10	1,43	39	1,30
3	7,5	73	0,10	2,43	45	1,50
4	2,5	25	0,10	0,83	35	1,17
5	4,5	45	0,10	1,50	39	1,30
6	7,5	75	0,10	2,50	45	1,50
7	2,5	29	0,09	0,97	35	1,17
8	4,5	49	0,09	1,63	39	1,30
9	7,5	79	0,10	2,63	45	1,50
10	10,0	120	0,11	4,00	50	1,67

Таблица 2. Варианты исследованных моделей соединений вида С21

Номер варианта	Высота выпуклости $a$ , мм	Ширина выпуклости $b$ , мм	Относительная высота $a/b$	Относительная ширина $b/s$	Высота выпуклости $a_1$ , мм	Ширина выпуклости $b_1$ , мм	Относительная высота $a_1/b_1$	Относительная ширина $b_1/s$	Полное сечение $s+a+a_1$	Коэффициент усиления $(s+a+a_1)/s$
11	2,5	23	0,11	0,77	0,83	7,6	0,11	0,25	33	1,11
12	4,5	43	0,10	1,43	1,50	14,3	0,10	0,48	36	1,20
13	7,5	73	0,10	2,43	2,50	24,3	0,10	0,81	40	1,33
14	2,5	25	0,10	0,83	0,83	8,3	0,10	0,28	33	1,11
15	4,5	45	0,10	1,50	1,50	15,0	0,10	0,50	36	1,20
16	7,5	75	0,10	2,50	2,50	25,0	0,10	0,83	40	1,33
17	2,5	29	0,09	0,97	0,83	9,6	0,09	0,32	33	1,11
18	4,5	49	0,09	1,63	1,50	16,3	0,09	0,54	36	1,20
19	7,5	79	0,10	2,63	2,50	26,3	0,10	0,88	40	1,33

кности в зоне шва равномерность распределения нарушается, максимальные напряжения в точке концентрации (перехода от основного к наплавленному металлу) превышают средние от 1,6 до двух и более раз. Вместе с тем большинство элементов конструкций из высокопрочных сталей, например, обшивка корпусов надводных кораблей и подводных лодок, рассчитываются на прочность при статическом осевом нагружении. Как показали экспериментальные исследования, при нагружении статической нагрузкой и достаточной пластичности металла такая концентрация, также, как и остаточные сварочные напряжения, не влияет на прочность сварного соединения в целом. С этой точки зрения использование выпуклости (усиления) для повышения несущей способности стыкового соединения при статическом нагружении вполне возможно.

Известные к настоящему времени работы посвящены определению степени концентрации напряжений в месте перехода от наплавленного к основному металлу [8–10] и влиянию концентрации на прочность сварных соединений [11, 12]. К сожалению, практически отсутствуют данные о напряженном состоянии наплавленного металла (металла шва) в целом и, как следствие, количественные зависимости, позволяющие определить размеры выпуклости, необходимые для компенса-

ции снижения характеристик прочности металла шва. Поэтому тема настоящей работы актуальна.

Цель настоящей работы — установление зависимости уровня и характера распределения напряжений от размеров выпуклости, выяснение возможности компенсации пониженной прочности металла шва увеличением размеров выпуклости.

Исследования проводили методом компьютерного моделирования с использованием лицензионного программного комплекса ANSYS (10 версии). Решали плоскодеформированные задачи с использованием конечных элементов (КЭ) PLANE 182. Исследовали стыковые соединения вида С25 (симметричные, с X-образной разделкой кромок) и С21 (несимметричные, с V-образной разделкой кромок) толщиной  $s = 30$  мм. Варьировались высота ( $a$ ) и ширина ( $b$ ) выпуклости (табл. 1). Форма выпуклости принималась в виде дуги.

Вследствие симметрии соединения С25 относительно горизонтальной  $x$  и вертикальной  $y$  осей КЭ модель строилась для верхней правой четверти физической модели с соответствующим закреплением узлов на осях  $x$  и  $y$  (рис. 1). В соединении С21, симметричном относительно только оси  $y$ , модель строилась для правой половины с соответствующим закреплением узлов на оси  $y$ .

Размер вдоль оси  $x$  выбирали так, чтобы вблизи торцов распределение напряжений было близ-

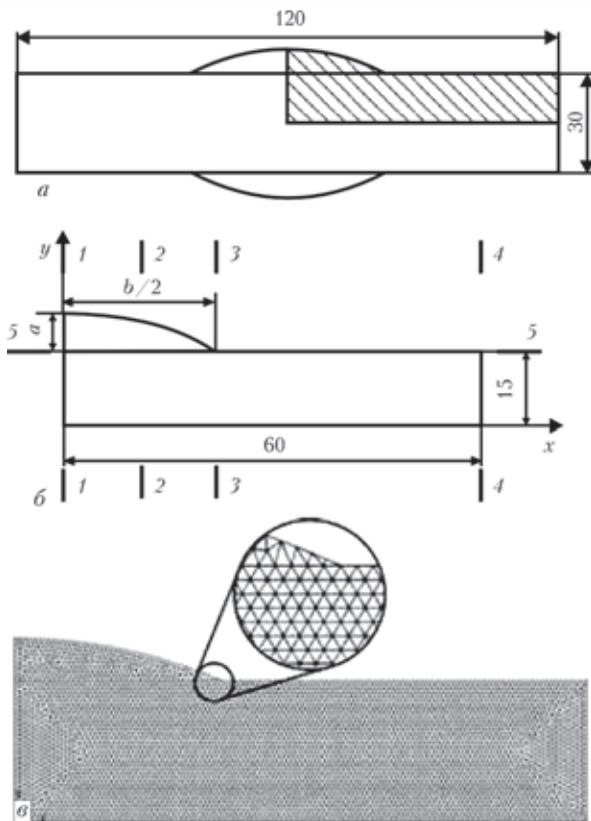


Рис. 1. Общий вид физической (а), расчетной (б) и конечно-элементной (в) моделей соединения вида С25 (описание 1–5 см. в тексте)

ким к равномерному, что исключало влияние этих участков на напряженное состояние в районе шва.

Решали упругую задачу. Физико-механические свойства приняты как для стали: модуль упругости  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ .

Модели загружали равномерно распределенными по торцам растягивающими усилиями, создающими на них напряжения  $\sigma_x = 100$  МПа.

Изучали поля продольных и поперечных, касательных и эквивалентных (по Мизесу) напряжений, а также их эпюры в сечениях по оси шва (1), на расстоянии  $b/4$  или  $b_1/2$  от оси  $y$  в соединениях С25 и С21 соответственно (2), по кромке выпуклости (3), по торцу узла (4) и вдоль верхней и нижней кромок моделей (5 и 6) (рис. 1, б и 2, б).

Анализ полей (рис. 3 и 4) показал, что их характер при изменении размеров выпуклостей в целом изменяется мало. Вблизи точек концентрации (переход от наплавленного металла к основному) появляются поперечные и касательные напряжения. Кроме того, небольшие поперечные и касательные напряжения возникают во внутренней части наплавленного металла. Металл в выпуклостях заметно разгружается.

Характер распределения продольных и эквивалентных напряжений отличается мало. На оси шва (сечение 1) соединения С25 эти напряжения максимальны в средней части, где они несколько превышают средний уровень, и постепенно

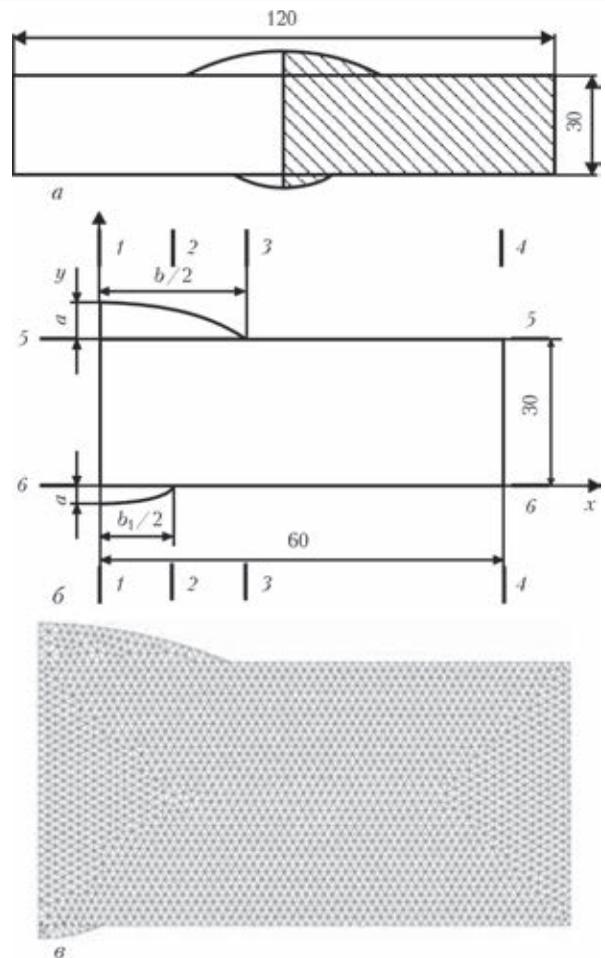


Рис. 2. Общий вид физической (а), расчетной (б) и конечно-элементной (в) моделей соединения С21 (описание 1–6 см. в тексте)

уменьшаются по мере приближения к выпуклостям (рис. 5). За счет появления поперечных и касательных напряжений уровень эквивалентных несколько отличается от продольных.

На расстоянии четверти ширины выпуклости (сечение 2) характер распределения и уровень напряжений сохраняется. В точке концентрации напряжений (сечение 3) все напряжения резко возрастают. Размеры выпуклости мало влияют на характер эпюр напряжений, несколько изменяя их уровень (рис. 5).

В соединении С21 характер распределения напряжений в верхней половине соединения в целом сохраняется, но уровень их несколько уменьшается в результате изгиба модели вследствие ее асимметрии относительно продольной оси (рис. 6). В нижней части при этом изгиб уменьшает степень разгрузки в области выпуклости (сечение 1) и увеличивает степень концентрации в точке перехода от основного к наплавленному металлу (сечение 2).

Для удобства количественной оценки уровня напряжений в табл. 3 и 4 приведены значения максимальных ( $\sigma_{\max 1}$ ,  $\sigma_{\max 2}$ ,  $\sigma_{\max 3}$ ), минимальных ( $\sigma_{\min 3}$ ) и средних ( $\sigma_{cp 1}$ ,  $\sigma_{cp 2}$ ,  $\sigma_{cp 3}$ ) эквивалентных

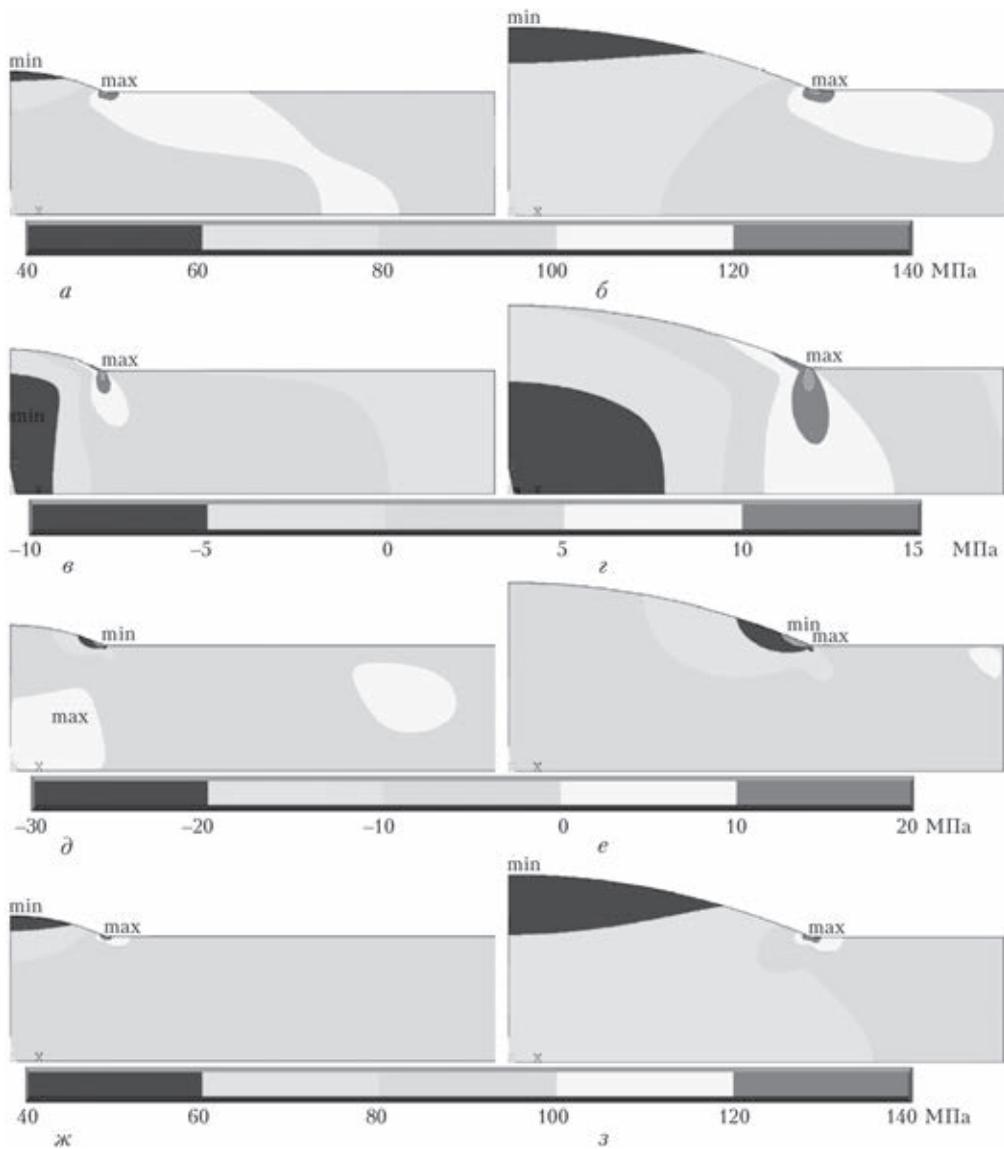


Рис. 3. Поля продольных (*а, б*), поперечных (*в, г*), касательных (*д, е*) и эквивалентных (*ж, з*) напряжений (варианты 1 (*а, в, д, ж*) и 3 (*б, г, е, з*))

напряжений в сечениях 1–3. Там же приведены значения коэффициентов перегрузки (степень превышения максимальных напряжений над средними в сечении) в первом и втором сечениях ( $\sigma_{\max 1} / \sigma_{\text{ср}1}$  и  $\sigma_{\max 2} / \sigma_{\text{ср}2}$ ) и коэффициенты концентрации напряжений в сечениях 3 ( $\sigma_{\max 3} / \sigma_{\text{ср}3}$ ) и 2 в соединении С21 ( $\sigma_{\max 2} / \sigma_{\text{ср}2}$ ).

Как видно из таблиц, степень перегрузки мало изменяется при изменении размеров выпуклости.

В соединении С25 при изменении коэффициента усиления (увеличения толщины в зоне шва) от 1,17 до 1,5 (табл. 1) коэффициент перегрузки по эквивалентным напряжениям остается на уровне 1,13...1,18 в сечении 1 и 1,07...1,10 в сечении 2. Как видим, изменение не превышает 3...5 %. Кроме того, сравнение сечений 1 и 2 показывает, что величина и характер распределения напряжений в них отличаются очень мало, при этом коэффициент перегрузки несколько больше в сечении 1, поэтому в дальнейших расчетах будем рассма-

тривать только сечение 1, а коэффициент перегрузки примем равным 1,145 по эквивалентным напряжениям.

В сечении 3 коэффициент концентрации напряжений ( $\sigma_{\max 3} / \sigma_{\text{ср}3}$ ) при изменении коэффициента усиления шва  $k_{yc} = (s + 2a) / s$  от 1,17 до 1,50 увеличивается незначительно и остается на уровне около 2 (1,92...2,18).

В соединении С21 при изменении коэффициента усиления в исследованных вариантах в пределах 1,11...1,33 (табл. 2) коэффициент перегрузки по эквивалентным напряжениям в сечении 1 изменяется пропорционально от 1,14 до 1,34, т. е. остается практически равным коэффициенту усиления.

В сечении 2 коэффициент концентрации с ростом коэффициента усиления увеличивается от 1,43 до 2,39, а в сечении 3 практически не изменяется, оставаясь в пределах 1,59...1,70.

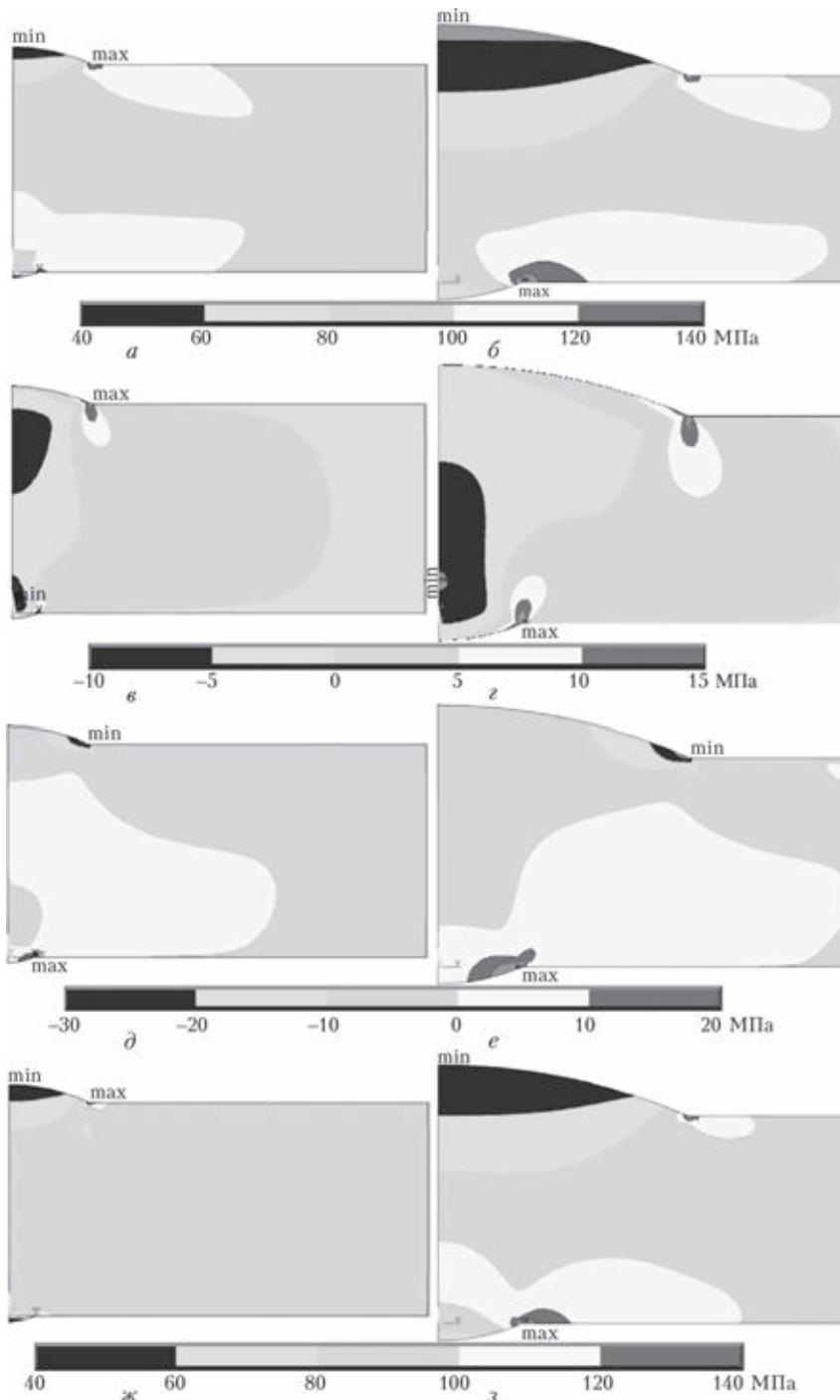


Рис. 4. Поля продольных (а, б), поперечных (в, г), касательных (д, е) и эквивалентных (ж, з) напряжений (варианты 11 (а, в, д, ж) и 13 (б, г, е, з))

В соединении С25 величина средних и максимальных эквивалентных напряжений в сечении I с увеличением высоты выпуклости уменьшается (рис. 7, а), что свидетельствует о принципиальной возможности использования выпуклости для компенсации снижения прочности металла шва и повышения прочности такого соединения при статических нагрузках.

В соединении С21 уровень максимальных напряжений в сечении I практически не зависит от высоты выпуклостей, хотя средние напряжения уменьшаются (рис. 7, б), т. е. в соединении это-

го типа увеличение даже статической прочности за счет величины выпуклостей практически невозможно.

Для получения зависимости необходимой высоты выпуклости в соединении С25 от соотношения прочности металла шва и основного металла введем понятие относительная прочность металла шва (степень или коэффициент разупрочнения металла шва, коэффициент снижения прочности металла шва)  $K_{\text{мш}} = \frac{\sigma_{\text{мш}}}{\sigma_{\text{ом}}} = \frac{\sigma_{\text{Гмш}}}{\sigma_{\text{Гом}}}$  и воспользуемся условием равновесия узла

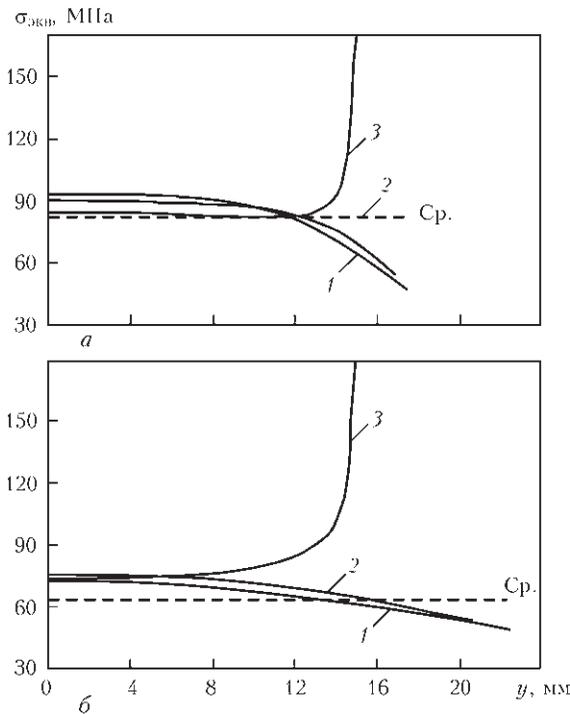


Рис. 5. Эпюры эквивалентных напряжений в сечениях 1–3 (варианты 1 (а) и 3 (б))

$$\sigma_{cp1}(s+2a) = \sigma_{ом4}s \quad (1)$$

и условием прочности для сечения 1

$$\sigma_{max1} \leq [\sigma_{мш}] \text{ или } k_{пер1} \sigma_{cp1} \leq [\sigma_{мш}], \quad (2)$$

где  $k_{пер1} = \sigma_{max1} / \sigma_{cp}$  — коэффициент перегрузки в сечении 1;  $[\sigma_{мш}]$  и  $\sigma_{тмш}$  — допускаемые напряжения и предел текучести металла шва соответственно;  $[\sigma_{ом}]$  и  $\sigma_{том}$  — допускаемые напряжения и предел текучести основного металла соответственно.

Из уравнения равновесия (1)

$$\sigma_{cp1} = \sigma_{ом} \frac{s}{s+2a} \text{ или } \sigma_{cp1} = \sigma_{ом} / k_{ус}, \quad (3)$$

где  $k_{ус} = \frac{s+2a}{s} \geq 1$  — коэффициент усиления шва.

Очевидно, в предельно нагруженном состоянии уравнение (3) запишется в виде  $\sigma_{cp1} = [\sigma_{ом}] / k_{ус}$ .

Тогда условие прочности в сечении 1 (2) можно записать в виде

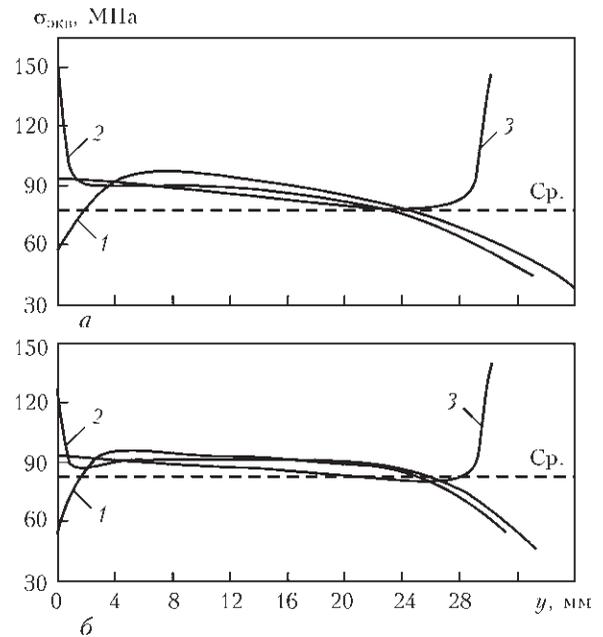


Рис. 6. Эпюры эквивалентных напряжений в сечениях 1–3 (варианты 11 (а) и 13 (б))

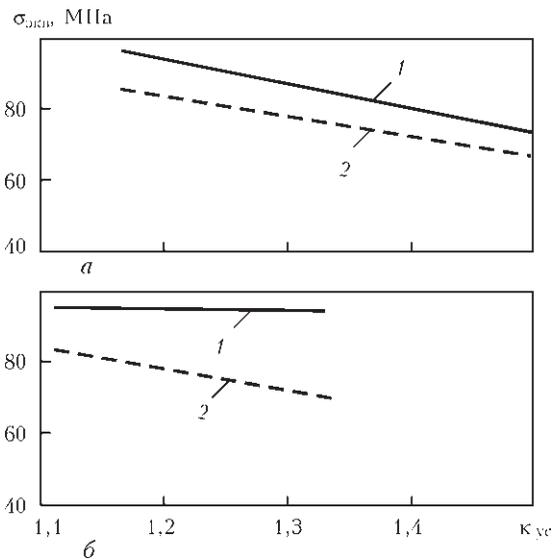


Рис. 7. Зависимость максимальных (1) и средних (2) эквивалентных напряжений в сечении 1 соединений C25 (а) и C21 (б) от коэффициента усиления шва

Т а б л и ц а 3. Эквивалентные напряжения в сечениях 1–3 в исследованных вариантах соединений вида C25

Номер варианта	$\sigma_{max1}$	$\sigma_{cp1}$	$\sigma_{max2}$	$\sigma_{cp2}$	$\sigma_{min3}$	$\sigma_{max3}$	$\sigma_{cp3}$	$\sigma_{max1}/\sigma_{cp1}$	$\sigma_{max2}/\sigma_{cp2}$	$\sigma_{max3}/\sigma_{cp3}$
1	93	82	89	83	84	170	85	1,13	1,07	2,00
2	87	74	84	77	77	183	83	1,18	1,09	2,20
3	72	64	75	68	73	188	81	1,13	1,10	2,30
4	92	82	89	83	83	167	85	1,12	1,07	2,00
5	86	74	83	76	77	180	83	1,16	1,09	2,20
6	72	63	75	68	73	186	81	1,14	1,10	2,30
7	91	81	88	82	82	160	85	1,12	1,07	1,90
8	84	73	82	76	77	174	83	1,15	1,08	2,10
9	70	63	74	68	74	182	81	1,11	1,09	2,20
Среднее значение для всех вариантов	-	-	-	-	-	-	-	1,14	1,08	2,13

Таблица 4. Эквивалентные напряжения в сечениях 1–3 в исследованных вариантах соединений вида С21

Номер варианта	$\sigma_{\max 1}$	$\sigma_{\text{cp}1}$	$\sigma_{\max 2}$	$\sigma_{\text{cp}2}$	$\sigma_{\min 3}$	$\sigma_{\max 3}$	$\sigma_{\text{cp}3}$	$\sigma_{\max 1}/\sigma_{\text{cp}1}$	$\sigma_{\max 2}/\sigma_{\text{cp}2}$	$\sigma_{\max 3}/\sigma_{\text{cp}3}$
1	95	83	123	86	80	141	88	1,14	1,43	1,60
2	97	78	150	81	78	146	87	1,24	1,85	1,68
3	95	71	177	74	77	148	87	1,34	2,39	1,70
4	95	83	126	86	80	140	88	1,14	1,47	1,59
5	97	78	150	81	78	146	87	1,24	1,85	1,68
6	94	71	176	74	77	147	87	1,32	2,38	1,69
7	95	83	126	86	81	136	88	1,14	1,47	1,55
8	96	78	150	81	78	143	87	1,23	1,85	1,64
9	94	70	175	73	77	145	87	1,34	2,40	1,67
Среднее значение для всех вариантов	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,64

$$k_{\text{пер}1} \frac{[\sigma_{\text{ом}}]}{k_{\text{ус}}} \leq [\sigma_{\text{мш}}] \text{ или } k_{\text{пер}1} \frac{[\sigma_{\text{ом}}]}{s + 2a} \leq [\sigma_{\text{мш}}],$$

откуда после преобразований получим

$$a \geq 0,5s \left( \frac{k_{\text{пер}}}{k_{\text{мш}}} - 1 \right), \quad (4)$$

или при  $k_{\text{пер}} = 1,145$   $a \geq 0,5s \left( \frac{1,145}{k_{\text{мш}}} - 1 \right)$ .

Таким образом, необходимая величина высоты выпуклости определяется степенью неравномерности распределения напряжений в металле шва ( $k_{\text{пер}} \geq 1$ ) и снижения прочности металла шва по сравнению с основным металлом ( $k_{\text{мш}} \leq 1$ ). Так, при  $k_{\text{пер}} = 1,145$  и снижении прочности металла шва на 20 %, т. е.  $k_{\text{мш}} = 0,8$  для толщины 30 мм, необходимая минимальная высота выпуклости составит 6,5 мм, а при снижении прочности металла шва на 10 % — 4 мм.

### Выводы

1. При изменении размеров выпуклости в довольно широких пределах коэффициент концентрации эквивалентных напряжений в точках перехода от основного к наплавленному металлу изменяется в пределах 1,9...2,3 в соединении С25, 1,55...1,7 с наружной стороны и 1,45...2,40 с обратной стороны соединения С21.

2. Наличие выпуклости в симметричном соединении С25 несколько снижает уровень растягивающих и эквивалентных напряжений внутри металла шва, что дает возможность компенсировать снижение его прочности по сравнению с основным металлом, но это снижение не пропорционально увеличению площади сечения.

3. Получено выражение, позволяющее рассчитать необходимую величину выпуклости в соединении С25 при известной степени снижения

прочности наплавленного металла по сравнению с основным.

4. Наличие выпуклостей и их размер в несимметричном соединении С21 практически не влияет на уровень максимальных эквивалентных напряжений в сечении по оси шва, поэтому компенсировать пониженную прочность металла шва увеличением выпуклостей невозможно.

- ГОСТ 5264–80. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1993. – 65 с.
- ГОСТ 8713–79. Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2005. – 39 с.
- ГОСТ14771–76. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. – 39 с.
- ГОСТ 2601–84. Сварка металлов. Термины и определения основных понятий. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1995. – 57 с.
- ДСТУ 3761.3–98. Зварювання та споріднені процеси. Частина 3. Зварювання металів: з'єднання та шви, технологія, матеріали та устаткування. Терміни та визначення. – Київ: Державний комітет стандартизації метрології та сертифікації України, 1999. – 54 с.
- Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций – М.: Высш. шк., 1982. – 272 с.
- Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций. – М.: Высш. шк., 1971. – 760 с.
- Кархин В. А. Влияние формы сварного шва на распределение напряжений при растяжении стыковых соединений большой толщины // Автомат. сварка. – 1985. – №9(390). – С. 25–28.
- Стаканов В. И., Костылев В. И., Рыбин Ю. И. О расчете коэффициента концентрации напряжений в стыковых сварных соединениях // Там же. – 1987. – №11(416). – С. 19–23.
- Кархин В. А., Костылев В. И., Стаканов В. И. Влияние геометрических параметров стыковых, тавровых и крестовых соединений на коэффициент концентрации напряжений // Там же. – 1988. – №3(420). – С. 6–11.
- Пустовит А. И., Воронин С. А., Ющенко К. А. Влияние концентрации напряжений на прочность сварных соединений мартенситной стали // Там же. – 1987. – №9(414). – С. 1–3.
- Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – Киев: Наук. думка, 2006. – 620 с.

Поступила в редакцию 30.05.2014

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАПЛАВКИ ПОД ФЛЮСОМ С ВЫСОКОЧАСТОТНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ТОРЦА ЭЛЕКТРОДА

**В. А. ЛЕБЕДЕВ<sup>1</sup>, С. В. ДРАГАН<sup>2</sup>, Ж. Г. ГОЛОБОРОДЬКО<sup>2</sup>, И. В. СИМУТЕНКОВ<sup>2</sup>, Ю. А. ЯРОС<sup>3</sup>**

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

<sup>2</sup> Нац. ун-т кораблестроения им. Адмирала Макарова. 54025, г. Николаев, просп. Героев Сталинграда, 9.  
E-mail: simutenkov@inbox.ru

<sup>3</sup> ООО НПФ «АМИТИ». 54028, г. Николаев, ул. Новозаводская, 42. E-mail: yaros.amity.mk.ua@gmail.com

Приложение к электроду высокочастотных импульсных перемещений, создаваемых с помощью специально разработанного электромеханического генератора, позволяет повысить производительность плавления электрода и обеспечить управление геометрическими параметрами валика при автоматической наплавке под флюсом. Цель настоящей работы — экспериментальная оценка влияния высокочастотных колебаний электрода на технологические характеристики процесса автоматической наплавки под флюсом конструкционных сталей. Установлено, что стабильность дугового процесса и качество формирования наплавленного слоя при автоматической наплавке под флюсом с высокочастотными импульсными перемещениями электрода соответствуют аналогичным показателям для наплавки без управляющего воздействия. Анализ осциллограмм силы тока и напряжения дуги показал, что высокочастотные колебания электрода позволяют управлять параметрами переноса электродного металла. Вследствие высокочастотных колебаний торца электрода под действием импульсных перемещений изменяется частота колебаний напряжения дуги: от 15...20 Гц — при естественном капельном переносе металла, к частотам без ярко выраженных экстремумов, что обусловлено измельчением капель, отделяемых с электрода. Увеличение частоты управляющего воздействия приводит к возрастанию коэффициента наплавки с 15,0 г/(А·ч) без колебаний до 22,6 г/(А·ч) при частоте 320 Гц. Изменение амплитуды колебаний от 0,5 до 3 мм в исследуемом диапазоне частот позволяет снизить долю основного металла в наплавленном при 30%-м перекрытии валиков с 0,25 (наплавка без колебаний) до 0,14. Библиогр. 9, рис. 5.

*Ключевые слова:* автоматическая наплавка, импульсное перемещение, колебания, электрод, технологические характеристики

Несмотря на длительный период развития существующая технология автоматической наплавки под флюсом привлекает внимание разработчиков, благодаря имеющемуся потенциалу повышения качества наплавленного слоя и производительности [1]. В полной мере раскрыть возможности автоматической наплавки под флюсом можно с помощью различных методов управления переносом электродного металла и свойствами наплавленного слоя. Наиболее активно для этого используют электрический, механический и магнитные методы, а также их комбинации [2, 3]. Комбинация нескольких методов позволяет подобрать наиболее эффективные параметры управляющего воздействия, однако такой подход, как правило, требует больших затрат [3]. Аналогичный эффект, но с меньшими затратами, можно достичь электромеханическим методом, реализуемым с помощью генератора высокочастотных импульсных перемещений электрода [4, 5] в сочетании с серийным сварочным оборудованием.

Сущность данного метода заключается в управлении процессом переноса электродного металла за счет периодического принудительного удаления жидкометаллического слоя с торца электрода в виде капель, масса которых определяется частотой вибрационного воздействия. Последнее, создаваемое генератором импульсных перемещений посредством ударника, прикладывается к электроду на участке вылета в соответствии со схемами, приведенными в [4].

Поперечное высокочастотное (до 10 кГц) механическое импульсное воздействие на электродную проволоку позволяет управлять размерами наплавленного валика и производительностью процесса при автоматической наплавке под флюсом. Исследования показали [4], что в этом случае глубина проплавления и доля основного металла в наплавке может быть снижена в 3 раза, а коэффициент расплавления электрода увеличен на 10...20 %.

Цель настоящей статьи — экспериментальная оценка влияния высокочастотных колебаний электрода на технологические характеристики процес-

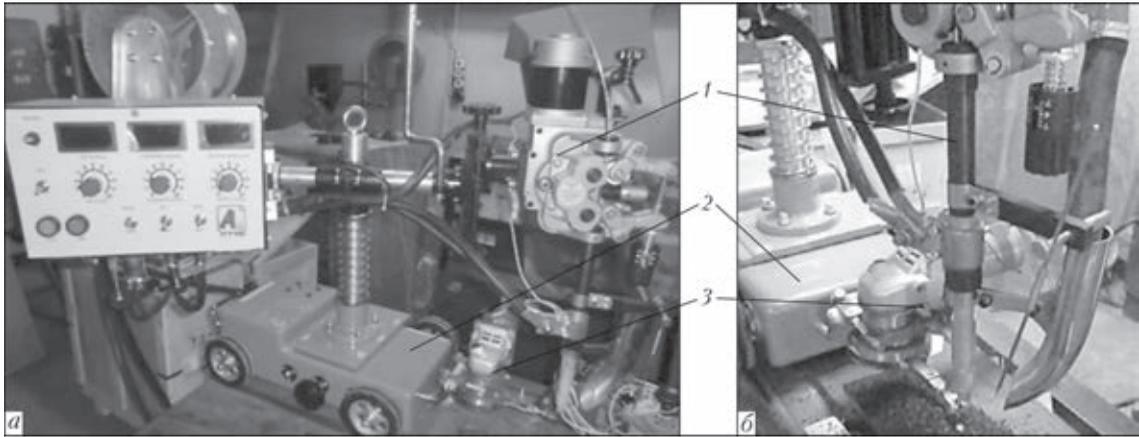


Рис. 1. Варианты размещения на сварочном тракторе генератора импульсных перемещений электродной проволоки: а, б — соответственно поперек и вдоль наплавляемого валика; 1 — сварочная головка; 2 — каретка трактора; 3 — механический генератор

са автоматической наплавки под флюсом узлов и деталей из конструкционных сталей (крановые колеса, шкивы тормозных барабанов и т. п.), подверженных интенсивному износу.

Программу экспериментальных исследований, а также оценку полученных результатов выполняли с использованием возможностей НУК им. Адмирала Макарова, ООО НПФ «АМИТИ» и ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

Исследования проводили на стенде, состоящем из сварочного комплекса АСТ 1000 (инверторный источник питания формирующий падающую вольт-амперную характеристику и сварочный трактор) и генератора высокочастотных импульсных перемещений электрода (рис. 1), который закреплен на сварочной головке, оснащенной системой регулирования напряжения дуги путем воздействия на скорость подачи проволоки. Применение стабилизированного источника питания позволило выполнять наплавку с колебаниями электрода (дополнительным возмущающим воздействием) на минимально допустимой силе тока при сохранении высокой стабильности процесса и скорости, рекомендованной нормативными документами [6].

Стабильность процесса наплавки и влияние колебаний электрода на характер переноса металла оценивали с помощью осциллограмм тока

и напряжения дуги, регистрируемых с помощью электронного USB-осциллографа, и статистически обработанных с помощью пакета прикладных программ Lab View 2013.

Наплавку валиков выполняли на образцы размерами  $500 \times 200 \times 10$  мм из конструкционной стали ВСт3сп. В качестве сварочных материалов в соответствии с рекомендациями [6] использовали следующие сочетания: проволоку Св-08А + флюс ОСЦ-45, проволоку Св-08Г2С + флюс АНК-18. Параметры режима наплавки устанавливали также в соответствии с [6]:  $d_3 = 2$  мм;  $I_n = 200 \dots 250$  А;  $U_d = 27 \dots 30$  В;  $v_n = 18 \dots 22$  м/ч. Высокочастотные импульсные перемещения во всех случаях прикладывали перпендикулярно оси электрода, но вдоль наплавляемого валика, параметры режима колебаний торца электродной проволоки изменяли в следующих пределах: частоту  $f_k = 250 \dots 9000$  Гц, амплитуду  $A_k = 0,5 \dots 3$  мм. Во всех случаях критериями выбора эффективных параметров режима колебаний служили технологическая стабильность процесса и качество формирования наплавленного слоя. Стабильность дугового процесса оценивали с помощью осциллограмм тока и напряжения, качество формирования наплавленных валиков — внешним осмотром и измерением. Коэффициент наплавки определяли по стандартной методике [7], геометрические параметры наплавленных валиков и долю основного металла — по макрошлифам (рис. 2).

Влияние механических высокочастотных колебаний электрода на стабильность процесса наплавки осциллографирование тока и напряжения оценивали непрерывно, начиная процесс без колебаний электрода, а затем продолжая его с колебаниями.

Следует отметить, что особенностью управления переносом металла с помощью поперечных колебаний электрода является отсутствие изменений длины дуги и связанных с этим колебаний

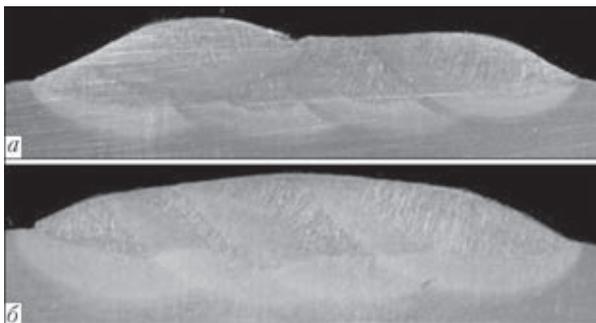


Рис. 2. Макрошлифы наплавленного слоя, выполненного без колебаний (а) и с высокочастотными (б) колебаниями электрода

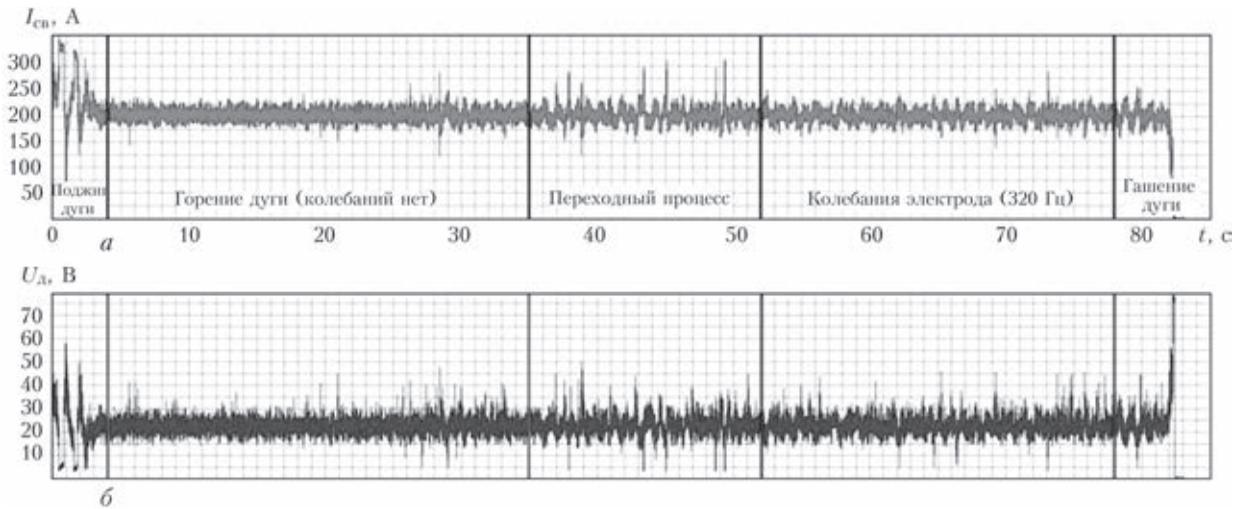


Рис. 3. Осциллограммы тока (а) и напряжения дуги (б) при наплавке ( $d_3 = 2$  мм;  $l_B = 50$  мм;  $I_H = 200$  А;  $U_d = 30$  В;  $v_H = 21$  м/ч;  $f_K = 320$  Гц)

напряжения, обусловленных самим процессом управления, в отличие, например, от процесса при импульсной подаче проволоки [2]. Указанный факт затрудняет идентификацию влияния колебаний электрода на перенос металла. В связи с этим наплавку проводили на режимах, для которых характерен достаточно четко видимый на осциллограммах (рис. 3) процесс крупнокапельного переноса металла [8]. На осциллограммах различаются участки поджига дуги, наплавки при отсутствии колебаний, переходного процесса (при включении генератора импульсных перемещений), наплавки с колебаниями электрода и гашения дуги.

При наплавке с колебаниями электрода, несмотря на некоторое увеличение амплитуды колебаний тока и напряжения, стабильность процесса остается высокой. Наблюдаются характерные периодические изменения исследуемых параметров, свидетельствующие о наличии управляемого процесса удаления жидкометаллического слоя с торца электрода. Подтверждением служат результаты, полученные путем обработки осциллограмм с помощью фурье-преобразования (рис. 4).

Анализ осциллограмм показывает, что колебания напряжения дуги с частотой  $f = 15 \dots 20$  Гц (рис. 4, а), характерные для естественного капель-

ного переноса металла, превращаются в спектр частот без ярко выраженных пиков (рис. 4, б), что связано с уменьшением влияния измельченных высокочастотными колебаниями капель на напряжение и силу тока в дуге. Появление пиков напряжения с частотой  $1 \dots 2$  Гц (рис. 4, б) связано с высокоамплитудными колебаниями ( $A_K > 3$  мм), создаваемыми генератором импульсных перемещений.

При наплавке без колебаний электрода и с колебаниями с частотой от 0, 250, 305 до 350 Гц коэффициент наплавки возрастает следующим образом: 15,0...15,2; 17,9...18,2; 19,6...20,0; 22,4...22,6 г/(А·ч), что подтверждают полученные ранее расчетные результаты [9].

Такое изменение коэффициента наплавки связано с тем, что по мере роста частоты колебаний электрода уменьшается толщина жидкометаллического слоя на торце электродной проволоки и средняя температура отделяемых капель. Вследствие этого повышаются эффективный КПД расплавления электрода дугой, скорость плавления электрода и производительность наплавочного процесса. При этом изменяется и геометрия наплавки (рис. 5): глубина проплавления основного

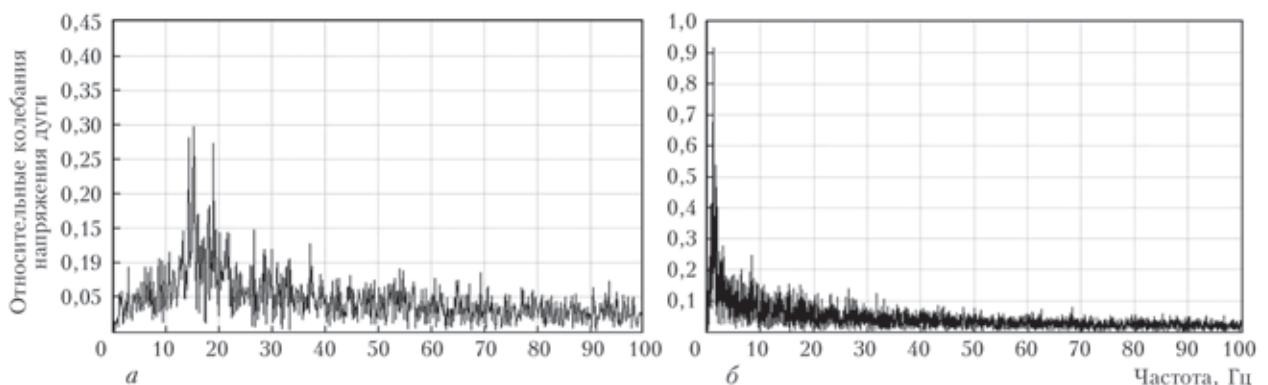


Рис. 4. Частотные спектры напряжения дуги при наплавке без колебаний (а) и с колебаниями (б) электрода

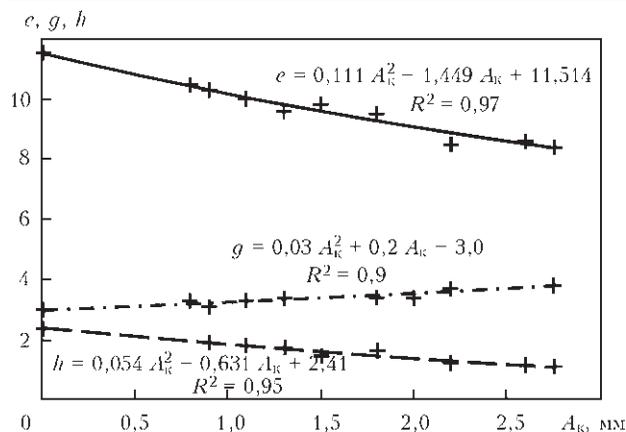


Рис. 5. Влияние амплитуды высокочастотных ( $f_k = 250 \dots 9000$  Гц) импульсных перемещений электрода на геометрические параметры наплавленного валика

металла  $h$  и ширина валика  $e$  снижаются, а высота валика  $g$  увеличивается.

Основным фактором, определяющим размеры наплавленного валика при высокочастотных колебаниях электрода, является амплитуда колебаний его торца. Амплитуда колебаний торца электродной проволоки при использовании разработанного генератора импульсных перемещений достаточно просто регулируется выбором точки приложения импульсного воздействия на вылете электрода и изменением частоты импульсных перемещений. Кроме того, регулировать амплитуду колебаний торца электрода можно путем изменения длины вылета, однако это возможно только в тех случаях, когда длина вылета может быть относительно свободно изменена (наплавка проволоками увеличенных диаметров 4...6 мм из сталей с низким удельным сопротивлением).

С увеличением частоты амплитуда колебаний пропорционально возрастает, тепловое и силовое воздействия дуги и капель электродного металла на сварочную ванну снижаются, вследствие чего глубина проплавления  $h$  и участие основного металла в наплавленном слое уменьшаются. Так, при наплавке с 30 %-м перекрытием валиков без колебаний электрода доля основного металла составляет 0,25, а при наплавке с колебаниями – 0,14, что является положительным фактором экономики сварочных материалов при наплавке.

Для количественной оценки влияния амплитуды колебаний на размеры валика при наплавке с высокочастотными колебаниями электрода экспериментальные данные (рис. 5) с достаточной для практики точностью (среднеквадратичное отклонение  $R^2 \geq 0,9$ ) аппроксимированы полиномами второй степени.

Полученные результаты дают основание считать, что технология автоматической наплавки

конструкционных сталей под флюсом с высокочастотными колебаниями электрода является рациональной при ремонте галтелей гребных валов и реборд крановых колес в соответствии с требованиями РД 212.0080–87 (распространяется на судовые механизмы и устройства, детали механизмов подъемно-транспортной техники портов и гидротехнических сооружений) [6].

## Выводы

1. Импульсное перемещение, прикладываемое к электродной проволоке, которое в свою очередь вызывает высокочастотные колебания торца электрода, позволяет управлять технологическими характеристиками процесса и геометрическими характеристиками валика при автоматической наплавке конструкционных сталей под флюсом.

2. С увеличением частоты импульсных перемещений пропорционально возрастает амплитуда колебаний электрода, достигая 3,0 мм при частоте 320 Гц. При этом коэффициент наплавки повышается с 15,0 до 22,6 г/(А·ч) без снижения стабильности дугового процесса, глубина проплавления увеличивается в 3 раза, высота наплавленного валика возрастает на 30 %.

1. *Лащенко Г. И.* Энергетические характеристики процессов дуговой сварки плавящимся электродом // Автомат. сварка. – 1998. – № 9. – С. 18–23.
2. *Лебедев В. А.* Аспекты выбора оборудования для электродуговой и автоматической сварки с импульсной подачей электродной проволоки // Свароч. пр-во. – 2008. – № 5. – С. 45–49.
3. *Патон Б. Е., Лебедев В. А., Микитин Я. И.* Способ комбинированного управления процессом переноса электродного металла при механизированной дуговой сварке // Там же. – 2006. – № 8. – С. 27–32.
4. *Голобородько Ж. Г., Драган С. В., Симутенков И. В.* Автоматическая наплавка под флюсом конструкционных сталей с поперечными высокочастотными перемещениями электрода // Автомат. сварка. – 2013. – № 6. – С. 35–38.
5. *Пат. 104894. Украина.* Устройство для подачи электродной проволоки / И. В. Симутенков, С. В. Драган, А. Ф. Галь; Заявитель и патентообладатель Национальный университет кораблестроения; Заявл. 21.12.2011; Опубл. 25.03.2014; Бюл. № 6.
6. *РД 212.0080–87.* Руководящий документ по стандартизации. Правила. Автоматическая наплавка стальных цилиндрических деталей углеродистой и коррозионноустойчивой сталью под флюсом. Основные положения. ОКСТУ. – Введен 01.03.88.
7. *Лесков Г. И.* Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970. – 335 с.
8. *Патон Б. Е., Лебедев В. К.* Электрооборудование для дуговой и электрошлаковой сварки. – М.: Машиностроение, 1966. – 359 с.
9. *Драган С. В., Симутенков И. В., Игнатенков О. В.* Методика определения параметров высокочастотных механических колебаний электрода при автоматической наплавке под флюсом // Вісн. ДДМА. – 2012. – № 3. – С. 124–129.

Поступила в редакцию 30.05.2014

# ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ДВУХФАЗНЫЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПОТОК

**А. Н. ДУБОВОЙ, А. А. КАРПЕЧЕНКО, М. Н. БОБРОВ**

Нац. ун-т кораблестроения им. Адмирала Макарова. 54025, г. Николаев, просп. Героев Сталинграда, 9.  
E-mail: welding@nuos.edu.ua

Известны публикации по повышению физико-механических свойств покрытий путем модуляции плазменной дуги, использованию дополнительных источников напряженности электрического поля. В работе изучено влияние электро- и импульсного воздействия на двухфазный высокотемпературный поток (ДВТП) и, как следствие, на структуру и эксплуатационные свойства электродуговых и плазменных покрытий. Исследована взаимосвязь амплитудно-частотных характеристик высоковольтных электрических импульсов с микроструктурой и свойствами полученных покрытий. Показано, что под влиянием электроимпульсного воздействия уменьшается размер капель металла в ДВТП и достигается более плотная структура плазменного порошка марки ПГ-19М-01 и электродугового покрытия из проволоки Св-08Г2С. Повышается прочность сцепления на 18...30 %, твердость на 20...35 %, а износостойкость возрастает в 1,7 раза. Библиогр. 8, табл. 3, рис. 5.

*Ключевые слова:* газотермические покрытия, электрический импульс, твердость, износостойкость, прочность сцепления

Разработка технологий упрочнения и восстановления деталей машин и их узлов остается актуальной проблемой, которая на современном этапе развития науки и техники преимущественно решается нанесением функциональных покрытий методами газотермического напыления (ГТН). Среди методов ГТН в последнее время все большее внимание уделяется плазменному и электродуговому. Плазменный метод характеризуется возможностью нанесения покрытий из тугоплавких материалов, а также универсальностью. Интерес к электродуговому напылению объясняется высокой производительностью метода, технологичностью и низкой стоимостью. Но наряду с этим есть присущие обоим методам недостатки: высокий уровень пористости (от 6 до 12 %), низкая адгезионная прочность (до 30 МПа для электродуговых покрытий и до 50 МПа для плазменных). Для повышения физико-механических свойств газотермических покрытий используют дополнительные технологические операции: оплавление, электро-механическую обработку, пропитку и т. п., что приводит к значительному повышению стоимости покрытий за счет увеличения энергозатрат, применения дополнительных материалов и создания новых устройств.

Известно, что повышение физико-механических свойств плазменных покрытий можно обеспечить наложением на постоянный ток плазмен-

ной дуги коротких импульсов. Так, в работах [1, 2] показано, что при модуляции дуги плазмотрон становится источником ударных волн, которые взаимодействуют с напыляемыми частицами на дистанции напыления. Данное взаимодействие приводит к измельчению и ускорению частиц, что обеспечивает повышение физико-механических свойств полученных покрытий. Известны работы [3, 4], посвященные плазменному напылению с использованием дополнительного источника напряженности электрического поля. Согласно проведенным исследованиям сделаны выводы о положительном влиянии данного воздействия на скорость частиц и прочность сцепления покрытий.

Цель настоящей работы заключалась в изучении влияния электроимпульсного воздействия на двухфазный высокотемпературный поток (ДВТП) и, как следствие, на структуру и эксплуатационные свойства электродуговых и плазменных покрытий.

Объектом исследований выбраны электродуговые покрытия из проволоки марки Св-08Г2С и плазменные покрытия из порошка марки ПГ-19М-01. Электродуговые покрытия наносили на установке КДМ-2 распылителем ЭМ-14М на следующем режиме: напряжение на дуге 25 В, сила тока 110 А, давление сжатого воздуха 0,6 МПа, дистанция напыления 100 мм. Плазменные покрытия наносили на установке «Киев-7», которая

**Таблица 1.** Интервал варьирования и уровни факторов при планировании эксперимента для электродугового и плазменного напыления с электроимпульсным воздействием

Наименование фактора	Частота, кГц	Напряжение, кВ
Кодированное обозначение	$X_1$	$X_2$
Нулевой уровень $X_{i0}$	6	7,5
Интервал варьирования $\Delta X$	2	2,5
Нижний уровень $X_i$	4	5
Верхний уровень $X_i$	8	10

укомплектована плазмотроном ПУН-1 на следующем режиме: напряжение на дуге 180 В, сила тока 150 А, дистанция напыления 180 мм, расход плазмообразующего газа 6,5 м<sup>3</sup>/ч; давление транспортирующего газа 0,01 МПа. В качестве плазмообразующего и транспортирующего газов использовали сжатый воздух. Твердость покрытий измеряли на приборе типа Виккерс при нагрузке на индентор 5 кг. Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе ММУ-3. Износостойкость покрытий определяли на машине трения СМЦ-2, прочность сцепления покрытий с основой — на разрывной машине УММ-5.

Для электроимпульсного воздействия на ДВТП использовали источник высоковольтных электрических импульсов, который подключали к распылителям по прямой схеме. Предварительные эксперименты показали, что использование частот до 4 кГц и напряжений до 5 кВ существенно не влияет на прочностные свойства покрытий и пористость, поэтому для планирования эксперимента выбраны соответствующие диапазоны частот и напряжений электрических импульсов (табл. 1).

**Таблица 2.** План и результаты опытов для электродуговых покрытий из проволоки Св-08Г2С

Кодированное значение факторов				Функция отклика, МПа					$Y_p$ , МПа	Среднеквадратическое отклонение, МПа
$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_{12}$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$		
+	+	-	-	2510	2570	2570	2490	2570	2542	34,9
+	-	-	+	2060	2060	2100	2080	2060	2072	16
+	+	+	+	2570	2570	2490	2440	2440	2502	58,4
+	-	+	-	2360	2290	2250	2320	2230	2290	46,9

**Таблица 3.** План и результаты опытов для плазменных покрытий из порошка марки ПГ-19М-01

Кодированное значение факторов				Функция отклика, МПа					$Y_p$ , МПа	Среднеквадратическое отклонение, МПа
$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_{12}$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$		
+	-	-	+	1330	1372	1390	1400	1330	1364	29,5
+	-	+	-	1470	1430	1450	1450	1415	1443	18,9
+	+	-	-	1230	1270	1270	1320	1270	1272	28,6
+	+	+	+	1290	1280	1320	1294	1254	1288	21,4

Для определения оптимальных параметров электроимпульсного воздействия на ДВТП применяли метод полного факторного эксперимента типа 2<sup>k</sup>. Параметром оптимизации являлась твердость покрытий. В качестве варьируемых факторов были выбраны частота и напряжение. Такие факторы как сила тока, напряжение, дистанция напыления и т. д. зафиксировали на выше указанных режимах. На каждом режиме напыляли по пять образцов, после чего их шлифовали до толщины покрытия в 1 мм и измеряли их твердость HV5.

План полного факторного эксперимента и его результаты представлены в табл. 2 и 3.

На основании статистически обработанных экспериментальных данных рассчитывали коэффициенты регрессий, проводили проверку их значимости и проверку адекватности полученных моделей реальному процессу напыления электродуговых и плазменных покрытий по известным методикам [5], в результате чего были получены следующие уравнения регрессии:

для электродугового напыления:  $Y = 2352 + 171X_1 + 45X_2 - 65X_1X_2$ ;

для плазменного напыления:  $Y = 1342 - 62X_1 + 24X_2 - 16X_1X_2$ .

По построенным моделям провели оптимизацию параметров электроимпульсного воздействия на ДВТП по методу крутого восхождения. При электродуговом напылении максимальное значение твердости получили при частоте 6,5 кГц, при плазменном — 5 кГц. Значение напряжения составило 5 кВ. Анализ микроструктур (рис. 1) свидетельствует о том, что использование электроимпульсного воздействия на ДВТП приводит к измельчению структурных элементов покрытия, а также к снижению пористости с 6 до 3 % для электродуговых покрытий и с 6 до 2 % для плаз-

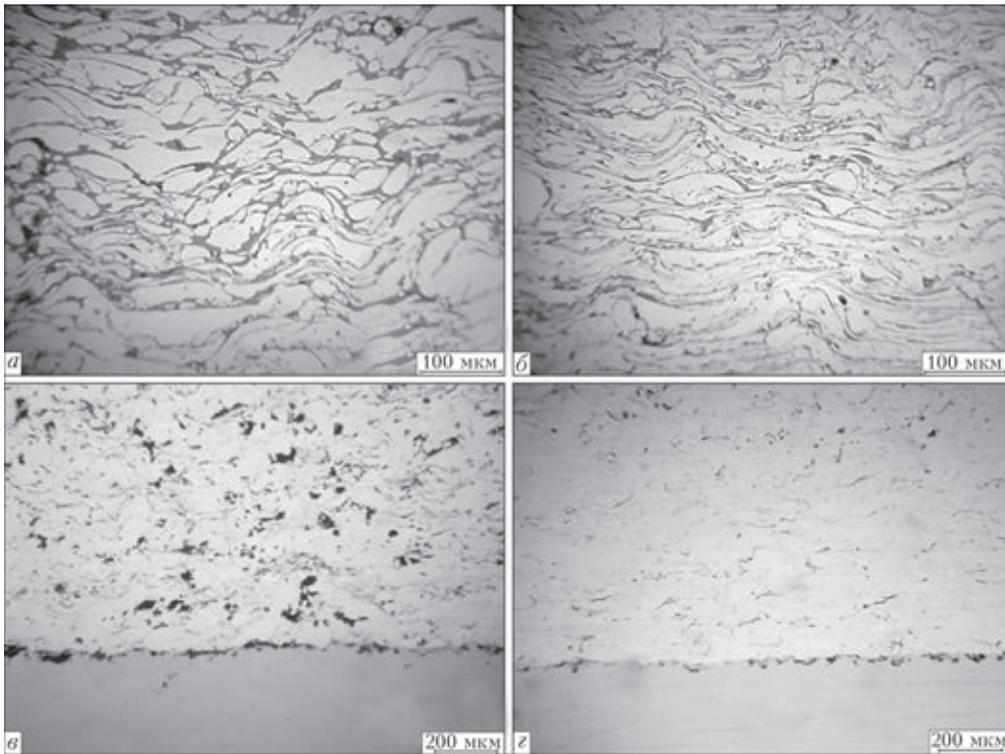


Рис. 1. Микроструктуры покрытий: *a* — электродуговое покрытие, полученное по традиционной технологии; *b* — электродуговое покрытие, нанесенное с применением электроимпульсного воздействия (частота 6,5 кГц, напряжение 5 кВ); *c* — плазменное покрытие, полученное по традиционной технологии; *d* — плазменное покрытие, нанесенное с применением электроимпульсного воздействия (частота 5 кГц, напряжение 5 кВ).

менных покрытий, при этом твердость покрытий повысилась на 35 и 20 % соответственно.

Фракционный состав напыляемых частиц определяли металлографическим методом по пробам, собранным при напылении в воду. Снимки микроструктур получали цифровой камерой Delta Optical HDCE-20C, укомплектованной программным обеспечением Score Image 9.0. Полученные снимки анализировали в программном металлографическом комплексе MEGRAN. Всего проанализировано по пять проб, в каждую из которых входило около 1000 частиц. Результаты исследований, приведенные на рис. 2, показали, что при использовании электроимпульсного воздействия на оптимальном режиме наблюдается дополнительное дробление частиц в двухфазном потоке.

Как при плазменном, так и при электродуговом напылении капли расплавленного металла диспергируются под действием аэродинамического влияния струи газа. При этом диспергирование жидкой капли происходит только при достижении критического значения диаметра капли, при меньшем размере распад капли невозможен. При использовании дополнительного накладывания электрических импульсов на ДВТП возможно дальнейшее дробление жидкой капли двумя путями. Первый объясняется возникновением несамостоятельного газового разряда при приложении импульсной разницы потенциалов на дистанции напыления. Газовый разряд сопрово-

ждается возникновением ударных волн, которые дополнительно диспергируют жидкие капли в высокотемпературном потоке. Второй связан с приобретением дополнительного заряда жидкими частицами, что приводит к снижению их поверхностного натяжения и ее распаду за счет возникновения кулоновских сил отталкивания в переменном электрическом поле [6–8]. Воздействие ударных волн обеспечивает повышение скорости частиц, а связанное с дроблением уменьшение отклонения от среднего диаметра приводит к уменьшению разброса по скоростям. Все это обеспечивает более плотную и равномерную упаковку

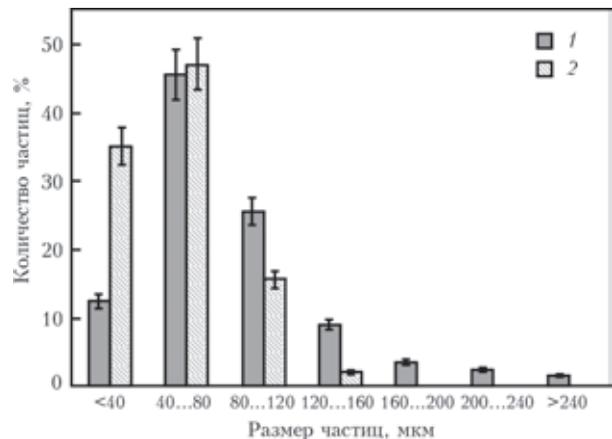


Рис. 2. Фракционный состав частиц при электродуговом напылении: 1 — напыление проводили по традиционной технологии; 2 — с использованием электроимпульсного воздействия на оптимальном режиме

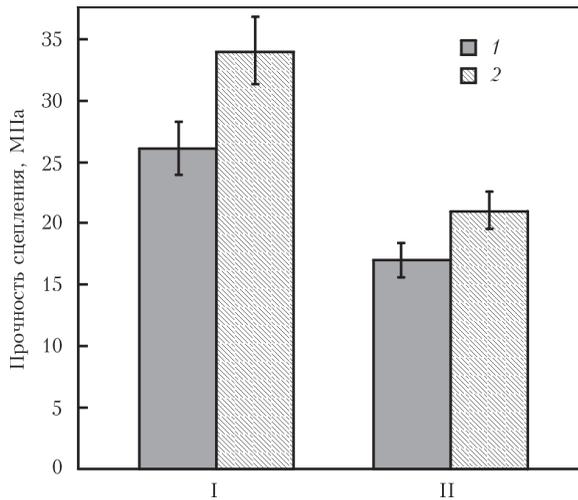


Рис. 3. Результаты определения прочности сцепления электродуговых (I) и плазменных (II) покрытий; 1 — напыление проводили по традиционной технологии; 2 — с использованием электроимпульсного воздействия на оптимальном режиме

частиц в покрытии, прочность его увеличивается, пористость снижается.

Для определения эксплуатационных свойств покрытий проведены испытания на прочность сцепления покрытий с основой и износостойкость.

Прочность сцепления покрытий с основой определяли методом «вытягивания конусного штифта». Образцы для определения прочности сцепления изготавливали из углеродистой конструкционной качественной стали 45. Перед нанесением покрытий поверхность обезжиривали техническим этанолом и подвергали струйно-абразивной обработке. Толщина нанесенных покрытий составляла 0,6 мм. Напыление проводили на выше указанных режимах. Для получения результатов прочности сцепления покрытий с основой напыление на одном режиме осуществлялось в один проход на пять образцов. Для каждого режима проводилось по пять параллельных

опытов. На рис. 3 представлены результаты определения прочности сцепления покрытий с основой.

Таким образом, при наложении высоковольтных электрических импульсов амплитудой 5 кВ, частотой 6,5 кГц на ДВТП наблюдается повышение прочности сцепления электродугового стального покрытия на 30 %, а бронзового плазменного покрытия на 20 %. Повышение адгезии полученных покрытий можно объяснить увеличением их скорости как за счет дробления, так и воздействия ударных волн, что обеспечивает большую фактическую площадь контакта частиц с основой.

Износостойкость электродуговых покрытий определяли по схеме ролик — колодка (рис. 4, а) при ограниченной подаче смазки со скоростью 30 капель в минуту. В качестве смазки использовали моторное масло марки М10Г2К ГОСТ 8581–75. Окружная скорость вращения ролика составляла 0,8 м/с, давление 4 МПа. Замеры потерь массы проводили после приработки на весах ТВЕ-0.21 через каждые 10 км пути. Всего было снято по 10 замеров.

Колодку и ролик изготавливали также из стали 45. Электродуговое покрытие после обезжиривания и струйно-абразивной обработки наносили на ролик. Колодку подвергали термическому улучшению: закалку осуществляли с температуры 840 °С и выдержке в течение 50 мин, охлаждение в воде. После закалки твердость составила HRC 54...55. Затем проводили отпуск при температуре 550 °С с выдержкой в течение 1 ч и охлаждением на воздухе. Твердость после отпуска составила HRC 30...32.

Анализ результатов определения износостойкости (рис. 4, б) показал, что электродуговое покрытие, нанесенное с использованием высоковольтных электрических импульсов, имеет в 1,7 раза меньший износ, чем покрытие, напыленное по традиционной технологии.

Анализ поверхности трения (рис. 5) покрытий показал, что при заданных условиях для исследуемых образцов характерно механохимическое изнашивание, сопровождающееся образованием на поверхности сопряженной пары пленок, обогащенных кислородом.

Поверхность трения ролика, напыленного с наложением электрических импульсов (рис. 5, б) является более плотной и имеет пористость в 2 раза меньше, чем покрытие, напыленное по традиционной технологии (рис. 5, а). На рис. 5, б видны следы трения небольшой глубины, которые более равномерно расположены по трущейся поверхности, что приводит к меньшему износу.

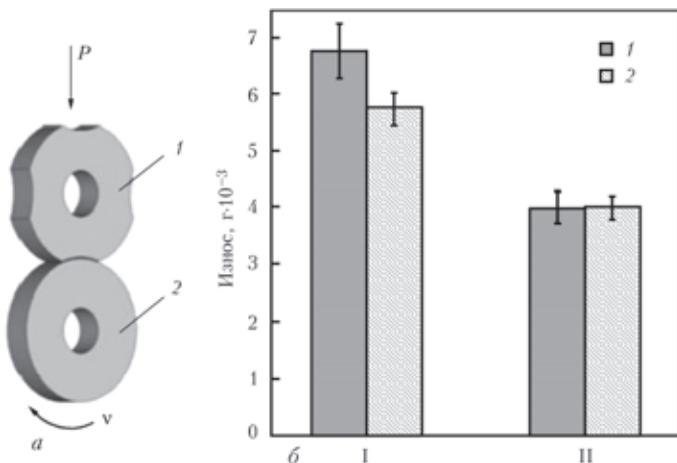


Рис. 4. Износостойкость электродуговых покрытий: а — схема испытаний на износостойкость (1 — колодка; 2 — ролик); б — результаты испытаний на износостойкость: I — без наложения электрических импульсов; II — с наложением высоковольтных электрических импульсов частотой 6,5 кГц, напряжением 5 кВ (1 — покрытие; 2 — колодка)

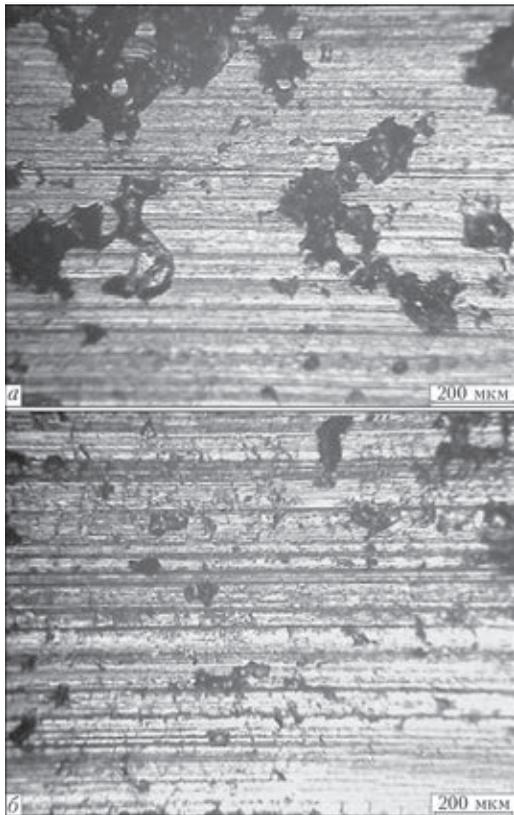


Рис. 5. Микроструктуры поверхности трения напыленного ролика: *а* — напыление по традиционной технологии; *б* — с использованием электроимпульсного воздействия на оптимальном режиме

Следует отметить, что стоимость источника генерирования высоковольтных электрических импульсов составляет около 5 % стоимости, например, оборудования для электродугового напыления. При этом эффект от его применения может обеспечивать получение покрытий с повышенными в среднем на 30 % эксплуатационными свойствами.

### Выводы

Использование электроимпульсного воздействия на ДВТП при электродуговом и плазменном напылении покрытий позволяет уменьшить размер капель металла в двухфазном потоке и получить более плотную структуру плазменного покрытия из порошка марки ПГ-19М-01 и электродугового покрытия из проволоки Св-08Г2С. Установлены оптимальные параметры электроимпульсного воздействия при плазменном и электродуговом напылении покрытий из упомянутых материалов, которые обеспечивают повышение прочности сцепления на 18...30 %, твердости на 20...35 % соответственно, износостойкости электродугового покрытия в 1,7 раза.

1. Гутман Б. Е. Измельчение капель при плазменном напылении с модуляцией тока // Автомат. сварка. – 1988. – № 9. – С. 37–39.
2. Кадырметов А. М. Исследование процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий и пути управления их качеством // Научный журнал КубГАУ. – 2012 – № 81. – С. 1–18.
3. Коротких В. М. Управляемые энергоэффективные технологии плазменного напыления защитных покрытий сельскохозяйственного назначения // Вестник Алтайского гос. аграрного ун-та. – 2011. – № 8(82). – С. 83–87.
4. Пат. 2335347, Россия, МПК В05В7/22. Установка плазменного напыления / Н. В. Гальшкин, В. М. Коротких; Заявитель и патентообладатель Гос. образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (АлтГТУ). – Заявл. 09.01.2007.
5. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
6. Григорьев А. И. Электродиспергирование жидкости при реализации колебательной неустойчивости ее свободной поверхности // Ж. техн. физики. – 2000. – Т. 70. – Вып. 5. – С. 22–27.
7. Григорьев А. И. Капиллярные электростатические неустойчивости // Соровский образовательный журнал. – 2000. – Т. 6. – Вып. 6. – С. 37–43.
8. Григорьев А. И. Электростатическая неустойчивость сильно заряженной струи электропроводной жидкости // Ж. техн. физики. – 2009. – Т. 79. – Вып. 4. – С. 36–45.

Поступила в редакцию 20.06.2014

## Международная научно-техническая конференция «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ И ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ»

11–12 ноября 2014

Россия  
г. Санкт-Петербург  
ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»

### Тематика

- Сварка, родственные процессы и технологии в экстремальных и особых условиях
- Оборудование для реализации технологий
- Материалы для сварки
- Работоспособность сварных соединений и конструкций
- Металлургические и физические процессы
- Методы и средства контроля
- Аттестация, сертификация, технический надзор
- Методологические и технико-экономические аспекты

Контакты: тел. +7921 935-30-91, 947-82-74, 952-81-47

## НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РЕЖИМА В ЦЕПИ С ЕМКОСТЬЮ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ, ПИТАЕМОЙ ОТ ИСТОЧНИКА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Е. Н. ВЕРЕЩАГО, В. И. КОСТЮЧЕНКО

Нац. ун-т кораблестроения им. Адмирала Макарова. 54025, Украина, г. Николаев, просп. Геров Сталинграда, 9.  
E-mail: vikmkua@mail.ru

Исследованы устойчивость и возникновение колебаний тока электрической дуги при определенных условиях в электрической цепи постоянного тока. Отмечено, что в цепи с дугой всегда будет параллельная ей емкость, образуемая собственными емкостями установки. Электрическая дуга как элемент электрической цепи описывается обобщенной моделью, которая учитывает термическую инерционность электрической дуги и не ограничивает вид ее статической вольт-амперной характеристики. Рассмотрено влияние параметров электрической дуги на переходной процесс, получены условия возникновения незатухающих и нарастающих собственных колебаний. Представлены принципиальные и эквивалентные схемы рассматриваемого контура. Диссипативные свойства колебательной системы охарактеризованы с помощью коэффициента затухания контура, относительного демпфирования, а также коэффициента потерь энергии в системе. Определены частота срыва, полоса пропускания, частота собственных колебаний и резонансное сопротивление контура. Рассмотрены резистивное демпфирование колебаний, определено желаемое значение демпфирующего резистора, проиллюстрированы результаты расчетов и моделирования. Полученные результаты могут найти применение при проектировании и наладке новых источников питания для сварки и родственных технологий, а также оценки демпфирования и стабилизации работающих источников питания. Библиограф. 8, рис. 4.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, электрическая и плазменная дуга, устойчивость процесса, переходные процессы, демпфирование колебаний, расчет и моделирование

Устойчивость электрической дуги при определенных условиях в электрической цепи исследовалась неоднократно [1–8]. Обратим внимание на то, что в цепи с дугой всегда будет параллельная ей емкость, образуемая собственными емкостями установки. При этом емкость на выходе, например, в сварочных инверторах тока, используется в качестве фиксирующей (демпфирующей) цепи либо в целях помехоподавления [7]. Эти емкости достигают 0,001 мкФ, а с учетом емкости элементов запуска дуги и сети составляют даже несколько микрофард [1, 4, 7]. Теперь более подробно остановимся на устойчивом и неустойчивом состоянии электрической дуги с емкостью и ее влиянии на электрическую цепь.

В настоящей статье электрическая дуга как элемент электрической цепи описывается обобщенной моделью [3, 5, 7], которая учитывает термическую инерционность электрической дуги и не ограничивает вид ее статической вольт-амперной характеристики (ВАХ). Вследствие этого в схеме для исследования устойчивости неуправляемое нелинейное сопротивление — электрическая дуга имитировано дифференциальным сопротивлением  $R_{дф0}$  и последовательно с ним включенной малой паразитной индук-

тивностью  $L$ , зашунтированной активным сопротивлением  $R_1$ . В данном случае исследуемая электрическая цепь (рис. 1) образована параллельным соединением идеального источника тока, элемента с входным сопротивлением дуги  $Z_{д}(p)$ , сопротивления  $R_i$  и емкости  $C$ .

Наличие резистора  $R_i$  учитывает все виды потерь в системе — конечное (хотя и достаточно большое), внутреннее (выходное) сопротивление источника тока, а также влияние внешних цепей.

Характеристикой двухполюсника является его входное (или внутреннее) сопротивление

$$Z_{вх}(p) = Z(p) = \frac{k_1 + k_2 p}{1 + T_1 p + T_2^2 p^2}, \quad (1)$$

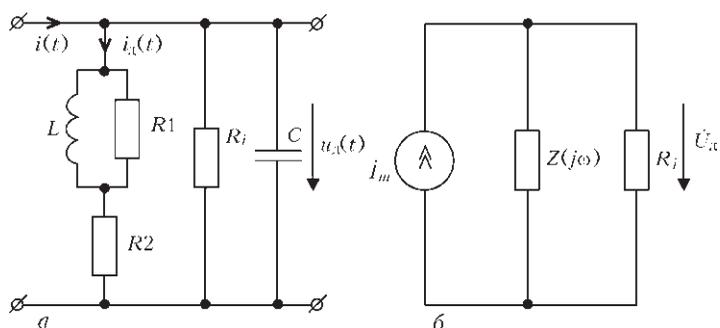


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и схема замещения (эквивалентная) рассматриваемого контура (б) ( $L = \theta(R_{ст0} - R_{дф0})$ ;  $R_1 = R_{ст0} - R_{дф0}$ ;  $R_{ст0}$ ;  $R_2 = R_{дф0}$  — статическое и дифференциальное сопротивление дуги в выбранной рабочей точке  $I_0$ )

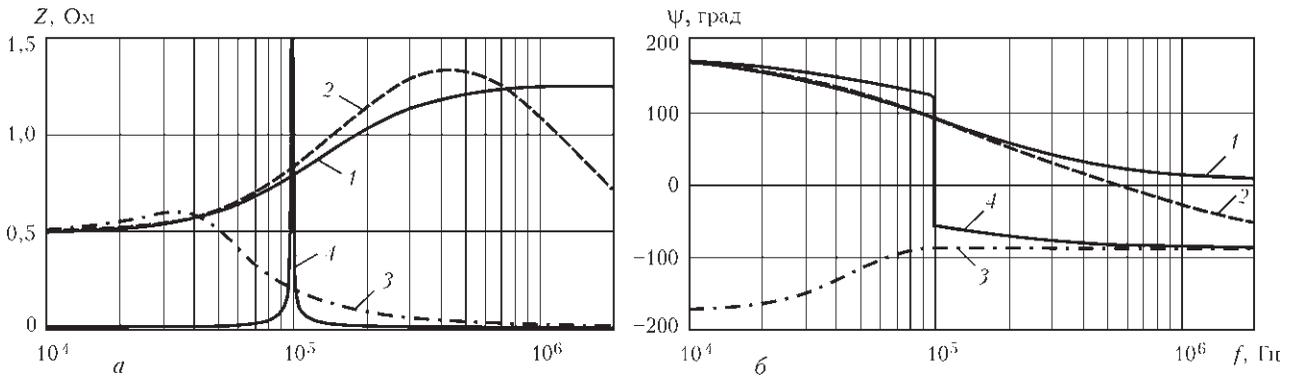


Рис. 2. Амплитудно- (а) и фазочастотная (б) характеристики двухполюсника: 1 —  $C = 0$  мкФ; 2 — 0,1; 3 — 10,0; 4 — 2,041

где  $k_1 = R_{дф0}$ ;  $k_2 = \theta R_{ст0}$ ;  $T_1 = \theta + R_{дф0}C$ ;  $T_2^2 = \theta R_{ст0}C$ ;  $\theta$  — постоянная времени дуги.

Если в уравнении (1) положить  $p = j\omega$ , то оно описывает при  $0 \leq \omega \leq \infty$  частотную передаточную функцию цепи

$$Z(j\omega) = \frac{k_1 + k_2 j\omega}{1 + T_1 j\omega + T_2^2 (j\omega)^2},$$

модуль которой и фаза имеют соответственно вид

$$|Z(j\omega)| = \frac{\sqrt{k_1^2 + k_2^2 \omega^2}}{\sqrt{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + T_1^2 \omega^2}},$$

$$\psi(\omega) = \arg Z(j\omega) = \arctg \frac{k_2 \omega}{k_1} - \arctg \frac{T_1 \omega}{1 - T_2^2 \omega^2}.$$

Формулу (1) удобно представить в виде

$$Z(p) = \frac{k_1 + k_2 p}{1 + 2\xi T p + T^2 p^2} = \frac{k_1 + k_2 p}{1 + \frac{2\xi p}{\omega_0} + \frac{p^2}{\omega_0^2}},$$

где

$$T = T_2 = \sqrt{\theta R_{ст0} C};$$

$$\xi = T_1 / (2T) = \frac{1}{2} \left( \sqrt{\frac{\theta}{R_{ст0} C}} + \sqrt{\frac{C}{\theta R_{ст0}}} R_{дф0} \right) \text{ — параметр демпфирования;}$$

$\omega_0 = 1 / \sqrt{\theta R_{ст0} C}$  — частота собственных колебаний системы;  $\alpha = \xi \omega_0$ .

Для описания двухполюсника используем представление

$$Z(j\omega) = r(\omega) + jx(\omega),$$

где

$$r(\omega) = \operatorname{Re} Z(j\omega) = \frac{k_1(1 - T_2^2 \omega^2) + k_2 T_1 \omega^2}{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + T_1^2 \omega^2};$$

$$x(\omega) = \operatorname{Im} Z(j\omega) = \frac{k_2 \omega(1 - T_2^2 \omega^2) - k_1 T_1 \omega}{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + T_1^2 \omega^2}.$$

Данное операторное сопротивление имеет единственный нуль при  $p = -R_{дф0} / R_{ст0} \theta$  и два полюса в точках с координатами

$$p_{1,2} = -\alpha \pm j\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{ст0} C} + \frac{R_{дф0}}{R_{ст0} \theta} \right) \pm j\sqrt{\frac{1}{\theta R_{ст0} C} - \frac{1}{4} \left( \frac{1}{R_{ст0} C} + \frac{R_{дф0}}{R_{ст0} \theta} \right)^2},$$

которые в зависимости от соотношения между  $\omega_0$  и  $\alpha$  могут быть как комплексно-сопряженными, так и вещественными.

Семейство амплитудно- и фазочастотных характеристик контура с параметрами:  $\theta = 1$  мкс,  $R_{ст0} = 1,25$  Ом,  $R_i = \infty$ ,  $R_{дф0} = -0,49$  Ом приведено на рис. 2.

Возникновение нарастающих собственных колебаний в электрической цепи с потерями (см. рис. 1, а) возможно лишь тогда, когда в составе цепи, помимо пассивных элементов  $R, L, C$ , содержатся активные, передающие в цепь часть энергии от внешних источников. Распространенной моделью такого активного элемента является резистор с отрицательным сопротивлением. Рассматриваемая цепь становится неустойчивой (будет самопроизвольно возбуждаться), если имеющееся в ней отрицательное сопротивление  $R_{дф0} > R_{дф0 \text{ кр}}$  (условие самовозбуждения заключается в полной компенсации потерь в контуре).

Емкость  $C$  может быть выбрана такой, чтобы двухполюсник был демпфированным в желаемой полосе пропускания, что устраняет влияние резонансного пика. При выборе емкости  $C$ , обеспечивающей значение параметра демпфирования около 0,7, частота среза двухполюсника может быть сделана соответственно большой.

В данном случае двухполюсник представляет собой низкочастотную систему, полоса пропускания которой представляет собой диапазон частот от нуля до частоты среза  $\omega_c$ . Отметим, что полосой частот двухполюсника, грубо говоря, является

диапазон частот, в котором величина  $Z(j\omega)$  близка к 1. Точное значение частоты среза, конечно, в значительной степени зависит от числа  $\xi$ .

Дифференциальное уравнение данной цепи, составленное относительно напряжения  $u(t)$  на входном сопротивлении контура, имеет вид

$$\begin{aligned} \theta R_{\text{ст}0} C \frac{d^2 u}{dt^2} + (R_{\text{дф}0} C + \theta) \frac{du}{dt} + u = \\ = \theta R_{\text{ст}0} \frac{di}{dt} + R_{\text{дф}0} i. \end{aligned} \quad (2)$$

Варьируя величину  $C$ , можно изменять коэффициент при производной  $du/dt$ . Знак и значение этого коэффициента, как известно, определяют характер свободных колебаний в такой динамической системе.

Если в уравнении (2)  $R_{\text{дф}0} < 0$ , то за счет обратной связи возможна регенерация, т. е. частичная компенсация потерь в контуре.

Найдем условия самовозбуждения схемы (см. рис. 1, а), исследуя характеристическое уравнение этой системы с внутренней обратной связью. Отметим, что если, например  $Y_{\text{отр}} = S_{\text{дф}} < 0$  ( $S_{\text{дф}}$  — дифференциальная крутизна ВАХ дуги) — отрицательная активная проводимость, вносимая электрической дугой, то условие самовозбуждения системы заключается в компенсации потерь контура.

Это означает, что в стационарном режиме энергия, рассеиваемая в контуре за период собственных колебаний, в точности равна энергии, которая поступает в контур от внешних источников за данный отрезок времени. Такой механизм самовозбуждения получил название внутренней обратной связи [3, 5, 7]. Колебательной системой здесь служит  $RLC$ -контур, элементом обратной связи —  $Y_{\text{отр}}$  (активный элемент).

Корни  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  характеристического уравнения (2) имеют вещественные части

$$\text{Re } \gamma_{1,2} = -\frac{R_{\text{дф}0} C + \theta}{2\theta R_{\text{ст}0} C}.$$

Система переходит в неустойчивый режим, когда величина  $\text{Re } \gamma_{1,2}$  обращается в нуль. При этом поскольку  $(1 - R_{\text{дф}0}/R_{\text{ст}0}) > 0$ , то имеем незатухающие гармонические собственные колебания вида

$$u_{\text{соб}}(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi),$$

где  $A$ ,  $\varphi$  определяются начальными значениями  $u(t_0)$  и  $u'(t_0)$ .

Если емкость конденсатора  $C$  достигает критического значения  $C_{\text{кр}} = -\theta S_{\text{дф}}$ , то характеристическое уравнение приобретает вид

$$d^2 u / dt^2 + \omega_0^2 u = 0, \quad (3)$$

где  $\omega_0 = \omega_C \sqrt{1 - \frac{R_{\text{дф}0}}{R_{\text{ст}0}}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{R_{\text{дф}0}}{R_{\text{ст}0}}}$  — частота собственных колебаний.

Отсюда находим критическое значение отрицательного сопротивления:

$$R_{\text{дф}0 \text{ кр}} = -\theta / C.$$

Из последнего выражения видно, что чем меньше емкость конденсатора  $C$ , тем больше отрицательное активное сопротивление, необходимое для самовозбуждения контура.

Для цепи рис. 1, а с параметрами  $C = 1,0$  мкФ,  $\theta = 10$  мкс  $R_{\text{дф}0 \text{ кр}} = -10,0$  Ом. Если  $R_{\text{дф}0} = -2,0$  Ом, то  $C_{\text{кр}} = 5$  мкФ.

Очевидно, что электрическая дуга с параллельной емкостью горит устойчиво, пока выполняется условие  $\theta > -CR_{\text{дф}0}$ .

Диссипативные свойства колебательной системы можно охарактеризовать с помощью коэффициента затухания контура  $\alpha$ , относительного демпфирования  $\xi = \alpha/\omega_0$  (безразмерный параметр), а также коэффициента потерь энергии в системе  $\eta = 2\alpha/\omega_0$ . Рассеяние энергии можно оценить и с помощью коэффициента поглощения  $\psi$ , связанного простой приближенной зависимостью с другой характеристикой процесса диссипации энергии в системе — логарифмическим декрементом колебаний  $\delta$ :  $\psi = 2\delta = 4\pi\alpha/\omega_0 = 4\pi \ln A_1/A_2$ , где  $A_1, A_2$  — амплитуды двух соседних колебаний относительно установившегося значения. При малом демпфировании ( $\delta^2 \ll 6$ )  $\eta = \delta/\pi = \psi/2\pi$ , а при больших значениях  $\delta$  можно использовать приближенную формулу из работы [7]:  $\eta = 2\delta / \sqrt{4\pi^2 + \delta^2} \approx \delta(1 - 0,0127\delta^2) / \pi$ , погрешность которой не превышает 1 % при  $\delta \leq 3$ .

При  $C > C_{\text{кр}}$  контур становится неустойчивым. Введя параметр

$$\alpha = \frac{1}{2} [-\theta / (LC) - R_{\text{дф}0} / L] \left( 1 - \frac{R_{\text{дф}0}}{R_{\text{ст}0}} \right) > 0,$$

получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 u}{dt^2} - 2\alpha \frac{du}{dt} + \omega_0^2 u = 0,$$

решение которого описывает гармонические колебания с экспоненциально нарастающей во времени амплитудой

$$u(t) = Ae^{\alpha t} \cos \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} t + Be^{\alpha t} \sin \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} t,$$

где  $A, B$  — постоянные, зависящие от начальных условий.

Если  $\alpha \ll \omega_0$ , то в соответствии с (3) частота заполнения автоколебаний, возникающих в линейном режиме, близка частоте собственных колебаний контура.

Обращаясь к эквивалентной схеме замещения (см. рис. 1, б), видим, что ток с комплексной ам-

плитудой  $I_m$ , поступающий от источника тока, протекает по сопротивлению

$$Z_{\text{эKB}}(j\omega) = Z(j\omega)R_i / [Z(j\omega) + R_i] = \frac{p\theta R_{\text{CT0}} + R_{\text{дф0}}}{p^2\theta R_{\text{CT0}}C + p[R_{\text{дф0}}C + \theta(1 + R_{\text{CT0}}/R_i)] + R_{\text{дф0}}/R_i + 1}$$

Несложные преобразования показывают, что

$$Z_{\text{эKB}}(j\xi) = \frac{R_{\text{рез.эKB}}}{1 + \xi_{\text{эKB}}^2} \quad (4)$$

где  $R_{\text{рез.эKB}} = R_{\text{рез}}/(1 + R_{\text{рез}}/R_i)$  — эквивалентное сопротивление контура при резонансе с учетом разрядного сопротивления  $R_i$ ;  $\xi_{\text{эKB}} = \xi_0/(1 + R_{\text{рез}}/R_i)$  — эквивалентная обобщенная расстройка;  $\xi_0$  — безразмерная обобщенная расстройка при  $R_i = \infty$ .

Можно считать, что влияние  $R_i$  состоит в том, что добротность колебательной системы уменьшается и становится равной эквивалентной добротности

$$Q_{\text{эKB}} = \frac{Q}{1 + R_{\text{рез}}/R_i}$$

Согласно последней формуле для ослабления действия  $-R_{\text{рез}}$  на колебательную систему следует уменьшать резонансное сопротивление  $R_{\text{рез}}$ , применяя параллельное включение  $R_i$ .

Рассмотрим параллельный колебательный контур с параметрами  $\theta = 1$  мкс,  $R_{\text{CT0}} = 1,25$  Ом,  $R_{\text{дф0}} = -0,49$  Ом,  $C = C_{\text{кр}} = 2,041$  мкФ, настроенный на частоту  $f_{\text{рез}}$ . Частота собственных колебаний в контуре

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\theta R_{\text{CT0}} C}} \sqrt{1 - R_{\text{дф0}}/R_{\text{CT0}} - \frac{C}{\theta} R_{\text{дф0}}^2/R_{\text{CT0}}} = 0,626 \cdot 10^6 \text{ (с}^{-1}\text{)}; f_0 = 99,7 \cdot 10^3 \text{ Гц} \approx 100 \text{ кГц.}$$

Резонансное сопротивление колебательной системы

$$R_{\text{рез}} = \frac{R_{\text{дф0}}[(\theta\omega_0)^2 R_{\text{CT0}}^2/R_{\text{дф0}}^2 + 1]}{(\theta\omega_0)^2 R_{\text{CT0}}/R_{\text{дф0}} + 1} = -10,66 \text{ (кОм).}$$

Эквивалентное сопротивление контура при резонансе с учетом шунтирующего действия  $R_i$  ( $R_i = 10$  кОм)

$$R_{\text{рез.эKB}} = 161,52 \text{ кОм.}$$

При настройке контура в резонанс  $\xi_{\text{эKB}} = 0$ , поэтому из (4) следует, что резонансный коэффициент передачи контура

$$K_{\text{рез}} = R_{\text{рез.эKB}}$$

Очевидно, что в данной цепи роль шунтирующего резистора  $R$  выполняет активное резонансное сопротивление контура  $R_{\text{рез}}$  без учета внутреннего сопротивления источника и демпфирующего резистора (вносимого сопротивления  $R_i$ ).

Если  $R_{\text{рез}} < 0$  — активная составляющая входного сопротивления контура при резонансе, а  $1/R_i > 0$  — параллельно включенная проводимость, вносимая источником тока и демпфирующим резистором, то условие обеспечения устойчивости и отсутствия самораскачивания (стабилизации и демпфирования) примет вид

$$-R_i/R_{\text{рез}} < 1.$$

Если это условие выполняется, то демпфирование, отраженное в основном уравнении малых колебаний членом с положительным коэффициентом, приводит к затуханию колебаний. Рассматриваемая система будет самопроизвольно возбуждаться, если имеющееся в ней отрицательное сопротивление меньше вносимого сопротивления  $-R_{\text{рез}} < R_{\text{ивн}}$ . Отметим, что вызываемые неустойчивостью перенапряжения оказывают воздействие на установку в целом.

Пример результатов расчета приведен на рис. 3. При этом основные условия с  $\theta = 1$  мкс,  $R_{\text{дф0}} = -0,49$  Ом;  $C = 2,041$  мкФ выбирали так, чтобы могли возникать неустойчивости. Следует отметить, что возникающая неустойчивость приводит к колебаниям как напряжения, так и тока дуги.

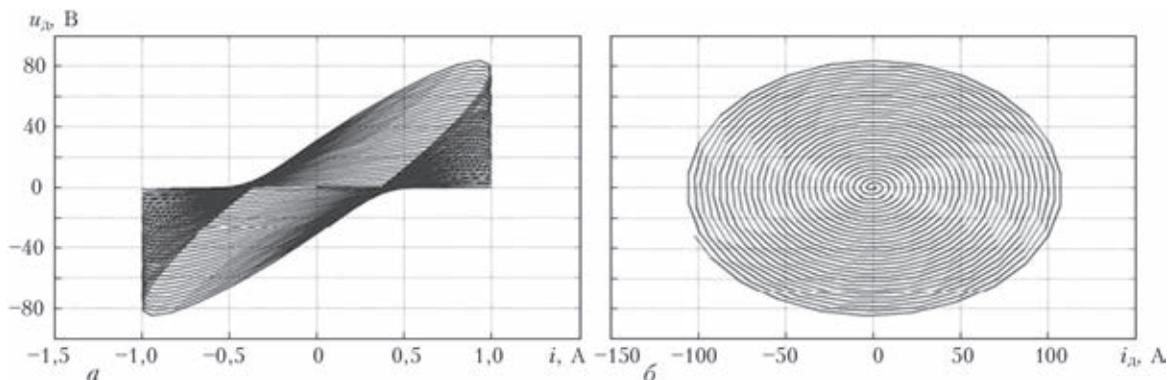


Рис. 3.  $u$ - $i$ -Диаграммы: а —  $u_d = f(i)$ ; б —  $u_d = f(i_d)$

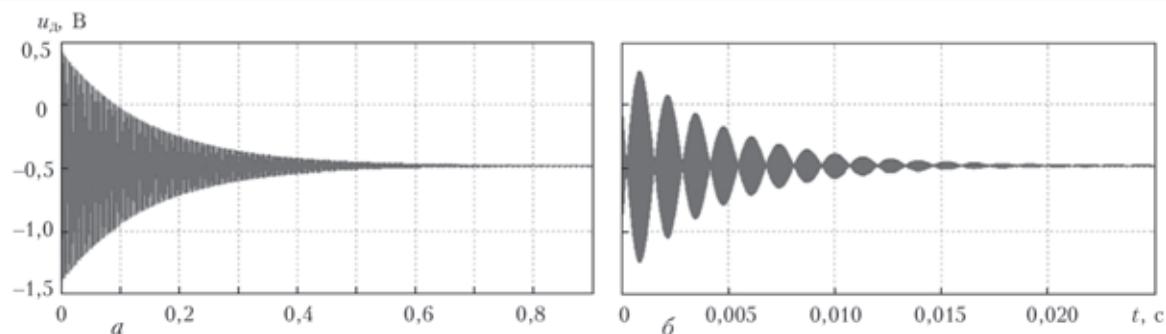


Рис. 4. Отклик цепи на функцию включения  $R_i = 10$  (а) и 1 (б) кОм

В  $u-i$ -диаграмме (см. рис. 3, б) спиральная форма характеристики показывает, что напряжение и ток дуги сдвинуты по фазе относительно друг друга.

Полезно сравнить переходные характеристики контура, полученные при различных значениях  $R_i/R_{рез}$  (рис. 4). Если  $R_i = 10$  кОм, то имеем собственные колебания с отрицательным затуханием (рис. 4, а).

Наконец, в общем случае переходная характеристика системы (рис. 4, б) представляет собой квазигармоническое затухающее колебание с биениями.

Влияние  $R_i$  в зависимости от отношения  $R_i/|R_{рез}|$  проявляется в скорости снижения во времени тока и напряжения дуги. При значениях отношения  $R_i/|R_{рез}|$  приблизительно от 0,95 до 0,5 оно вызывает сильное затухание колебаний напряжения (тока) по сравнению со случаем  $R_i = \infty$ . Если же, напротив, сделать это отношение еще меньше, то колебания, хотя и продолжают затухать, но относительное изменение уже не является таким большим. Кроме того, с уменьшением  $R_i/|R_{рез}|$  появляются биения.

Таким образом, для практических нужд сопротивление  $R_i$  для резистивного демпфирования должно составлять приблизительно  $R_i \approx |R_{рез}|$ .

## Выводы

1. В электрической цепи с электрической дугой возможно возникновение колебаний. Установив-

шаяся амплитуда колебаний определяется видом нелинейной характеристики электрической дуги, входящей в контур.

2. Найденные частотные характеристики входного сопротивления цепи позволяют определять области неустойчивости системы с комплексной линейной или нелинейной нагрузкой.

3. В контуре, имеющем только резистивное демпфирование при  $-R_i/R_{рез} \approx 1$ , колебания затухают достаточно медленно.

4. Емкость конденсатора  $C$  может быть выбрана такой, чтобы двухполюсник был демпфированным в желаемой полосе пропускания.

1. Верещаго Е. Н., Костюченко В. И. Физико-математическая модель цепи питания плазматрона // Свароч. пр-во. – 2013. – № 2. – С. 19–25.
2. Гладков Э. А. Управление процессами и оборудованием при сварке. – М.: Академия, 2006. – 430 с.
3. Демирчян К. С., Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники: Т. 2. Теория линейных электрических цепей. – СПб.: Питер, 2003. – 576 с.
4. Дюргеров Н. Г., Сагиров Х. Н. Устойчивость системы саморегулирования дуги при механизированной и автоматической сварке // Свароч. пр-во. – 2009. – № 2. – С. 13–14.
5. Лоос А. В., Лукутин А. В., Сараев Ю. Н. Источники питания для импульсных технологических процессов. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ин-та, 1998. – 160 с.
6. Сидорец В. Н., Пентегов И. В. Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой. – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. – 272 с.
7. Схемотехника инверторных источников питания для дуговой нагрузки: Учеб. пособие / Е. Н. Верещаго, В. Ф. Квасницкий, Л. Н. Мирошниченко, И. В. Пентегов. – Николаев: Нац. ун-т кораблестроения им. Адмирала Макарова, 2000. – 283 с.
8. Цыбульский Г. А. К вопросу об устойчивости процесса дуговой сварки плавящимся электродом // Автомат. сварка. – 2002. – № 5. – С. 17–19.

Поступила в редакцию 30.05.2014

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СВАРНЫХ БАЛЛОНОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Б. Е. ПАТОН, М. М. САВИЦКИЙ, А. М. САВИЦКИЙ, А. А. МАЗУР

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua; sam@paton.kiev.ua

Дана оценка технических и экономических возможностей транспортировки природного газа морским путем с учетом конструкции современных газозовозов, условий их загрузки–разгрузки и маршрутов следования. Показана перспективность использования контейнерного варианта транспортировки газа в Украину. При этом сокращается до 6 мес. подготовительный период для начала поставки газа, поскольку производство легких автомобильных баллонов и газовых труб в Украине уже освоено. В дальнейшем следует предусмотреть строительство и применение специализированных газозовозов, оснащенных длинномерными металлопластиковыми баллонами, которые сравнимы с короткими трубопроводами, что позволяет снизить коэффициент запаса прочности до 1,75. В результате снижается металлоемкость баллонов и увеличивается объем перевозимого газа. Для создания таких баллонов перспективно применение высокопрочных сталей типа 30ХГСА. Библиогр. 22, табл. 5, рис. 7.

*Ключевые слова:* морская транспортировка природного газа; металлопластиковые баллоны; длинномерные баллоны; высокопрочные стали; сварка с повышенными скоростями нагрева; активирующие флюсы, экономические показатели

Сварка — энергозависимый процесс. Ее развитие неразрывно связано с решением проблем обеспечения энергоносителями, особенно природным газом, который по энергетическим и экологическим характеристикам, а также стратегическим запасам превосходит все современные энергоносители [1, 2].

Украина, имея самую развитую в Европе газотранспортную систему, испытывает большой дефицит газа. Из традиционных собственных источников Украина сейчас может удовлетворить лишь треть своих потребностей [2]. Поиск новых традиционных месторождений на суше и шельфе связан с глубинным бурением и требует развития технической базы. Нетрадиционные источники — газосланцы, угольные пласты и другие плотные коллекторы еще недостаточно изучены ни в плане газоносности, ни — рисков, а потому также требуют значительных финансовых и временных затрат [2]. Технология использования возобновляемых источников газа пока имеет локальное применение, о чем свидетельствует разрастание свалок.

Особое место среди нетрадиционных источников метана принадлежит газогидратам. В них содержится до 70 % всех его мировых запасов, а в экономической черноморской зоне Украины до  $10^{14} \dots 10^{15} \text{ м}^3$  [3]. Однако промышленная разработка газогидратов еще не освоена, а ее освоение из-за опасности нарушения экологического равновесия на морском дне и выброса метана в околоземную атмосферу ведется крайне осторожно.

Не ускорят решение газовых проблем и предлагаемые КНР инвестиции в размере \$3,4 млрд для строительства в Донецкой, Луганской и Одесской областях заводов синтетического газа общей производительностью около 10 млрд  $\text{м}^3/\text{год}$ , а также \$3 млрд для строительства суперпорта с нефтяным и газовым терминалами. Последнее совпадает с намерениями украинских газодиверсифицировать газоснабжение за счет внешних закупок сжиженного природного газа (СПГ). Однако строительство приемного терминала для СПГ требует не только больших финансовых и временных затрат, но и долгосрочных контрактов для бесперебойного газоснабжения. Всего этого Украина не имеет, как не имеет и нормативно-правовой базы для строительства терминала для приема и переработки СПГ.

Более мобильной и менее затратной является технология поставок компримированного (сжатого) природного газа (КПГ).

Современные исследователи проблем газоснабжения доказывают [4–7], что при средних расстояниях (до 3000 мор. миль) и достаточной ( $\geq 12 \text{ млн м}^3$ ) емкости грузовой системы высокого давления газозовозов КПГ — технология может быть более быстроосваиваемой и экономичной. Сжатый газ не требует столь глубокой очистки, затрат на сжижение, хранение и регазификацию (табл. 1, рис. 1) [7]. А для его приема не требуются высокотехнологичные и дорогие береговые



Таблица 1. Сопоставление цены на газ в зависимости от расстояния (данные University of Houston) [7]

Расстояние, миль	Вид газа, \$/1000 м <sup>3</sup>		
	Сжиженный	Сжатый I	Сжатый II
500	355	272	272
1000	365	274...284	282...290
1500	375	306...310	315...326
2000	385	330...337	311...362
2500	395	344...390	350...398
3500	425	408...443	398...434
5000	465	484...549	470...543

Примечание: I. Объем газа 0,91·10<sup>6</sup> м<sup>3</sup>; II — 0,15·10<sup>6</sup>. Стоимость газа — \$ 75/1000 м<sup>3</sup>; сжижение — \$ 40/1000 м<sup>3</sup>; газификация — \$ 40/1000 м<sup>3</sup>.

сооружения. Загрузка газа может производиться непосредственно от ГТС или скважин на шельфе, а разгрузка через ГТС в газохранилища. В результате возможен компромиссный вариант, когда применение плавучего танкера — регазификатора и вынесенного в море за пределы акватории порта подводного буя типа STL (Submerged Turret Loading) позволит принимать и сжиженный, и сжатый газ. Это решение позволяет использовать как СПГ, так и КПП-технологии с той лишь разницей, что СПГ предварительно проходит через регазификатор в ГТС, а в КПП — напрямую. Такое решение проблемы газоснабжения позволит использовать колебание цен на спотовом рынке и ускорить диверсификацию поставок.

Кроме того, развитие КПП-технологии позволит ускорить освоение Черноморско-Азовского шельфа при добыче традиционного природного газа из малых и средних месторождений, от которых тянуть трубопроводы стоимостью около 9 млн грн./км к берегу экономически невыгодно. Применение КПП-газовозов (судов или барж) дает кардинальное решение проблемы доставки газа на берег. Апробирование этой технологии в США в 1960-е годы на больших расстояниях оказалось, однако, менее эффективным по сравнению с СПГ. Однако в связи с освоением шельфа и вхождением на газовый рынок более близких потребителей ситуация существенно изменяется.

Целью данной работы была оценка технических и экономических возможностей транспортировки природного газа морским путем с учетом конструктивных особенностей грузовых систем современных газовозов, условий их загрузки-разгрузки и маршрутов следования.

Исследования технических возможностей и экономической целесообразности применения КПП-технологии в Украине указывают на два варианта ее реализации. Первый основан на использовании существующих контейнеровозов, которые можно переоборудовать в газовозы, оснастив их контейнеры сварными цилиндрическими металлопластиковыми баллонами (рис. 2) [8, 9]. Техни-



Рис. 1. Ценовая составляющая для проектов КПП (а) и СПГ (б)ческие характеристики 20- и 40-футовых морских контейнеров и массогабаритные показатели комплектующих баллонов представлены в табл. 2.

Контейнерный вариант транспортировки газа в Украину позволяет сократить до 6 мес. подготовительный период для начала поставки газа, так как производство легких автомобильных баллонов и газовых труб в Украине уже освоено. Но на перспективу следует предусмотреть строительство и применение современных, специализированных газовозов, в которых есть возможность дальнейшего совершенствования грузовой системы. В качестве аналога здесь следует использовать комбинацию из двух проектов [5], дополнив их собственными разработками по металлопластиковым баллонам [8]. Проект «Coselle» предусматривает намотку в бухту трубы диаметром 156...162 мм и длиной до 10 миль, что, по решению береговой службы США, может рассматриваться как отрезок плавучего трубопровода с запасом прочности 1,75 вместо 2,5. Это позволяет снизить массу модуля (одной емкости), на 30 % увеличить количество модулей на судне, а соответственно, и суммарный объем грузовой системы.

Недостатком проекта является сложность изготовления бухт, что под силу всего трем-четырем заводам в мире. Поэтому представляется более целесообразным использовать идею, заложенную в проекте «Vortrans». Последним предусмотрена укладка длинномерных баллонов в герметичный охлаждаемый трюм вдоль корпуса судна. Авторы проекта предлагают повысить емкость грузовой системы газовоза за счет охлаждения баллонов с газом до -30 °С. При этом в результате снижения давления газа можно либо снизить металлоемкость баллонов, либо увеличить их вместимость.

Однако снижение рабочих температур, кроме энергопотерь, сопряжено, как известно, с повышением хрупкости высокопрочных сталей, которые могут дать максимальное улучшение массогабаритных характеристик баллонов. Поэтому здесь более целесообразно применить усиление стеклопластиком корпусов баллонов. Это позво-

лит избежать затраты на охлаждение при загрузке и подогрев при разгрузке, снизить их металлоемкость и исключить возможность охрупчивания и осколочного разрушения в случае образования усталостной или хрупкой трещины. Кроме того, длинномерные баллоны (200...300 м) можно рассматривать как лупинги (отводы трубопроводов), которые, как и магистральные трубопроводы, допускаются к эксплуатации с более низким запасом прочности. Опыт эксплуатации таких в густонаселенных регионах многих стран подтвержден многократно. Применяв же последовательную обвязку баллонов, их можно соединить в единый плавучий трубопровод [9, 10].

Таким образом, грузовую систему КПГ-газовозов можно усовершенствовать за счет либо снижения толщины стенки и, следовательно, металлоемкости без изменения рабочего давления, либо повышения рабочего давления при неизменных толщине стенки и металлоемкости [9].

Общеизвестно, что при нагружении внутренним давлением цилиндрического баллона с полусферическими днищами осевые напряжения

$$\sigma_o = \frac{r_{вн}}{2\delta} \frac{P_p}{\phi_{ш}} K_3 \quad (1)$$

в два раза ниже радиальных

$$\sigma_r = \frac{r_{вн}}{\delta} \frac{P_p}{\phi_{ш}} K_3, \quad (2)$$

где  $\sigma_o$  и  $\sigma_r$  — осевые и радиальные напряжения в стенках баллона соответственно, МПа;  $P_p$  — рабочее давление газа в баллоне, МПа;  $r_{вн}$  — внутренний радиус баллона, мм;  $\delta$  — толщина стенки металлического корпуса баллона, мм;  $\phi_{ш}$  — коэффициент прочности шва.

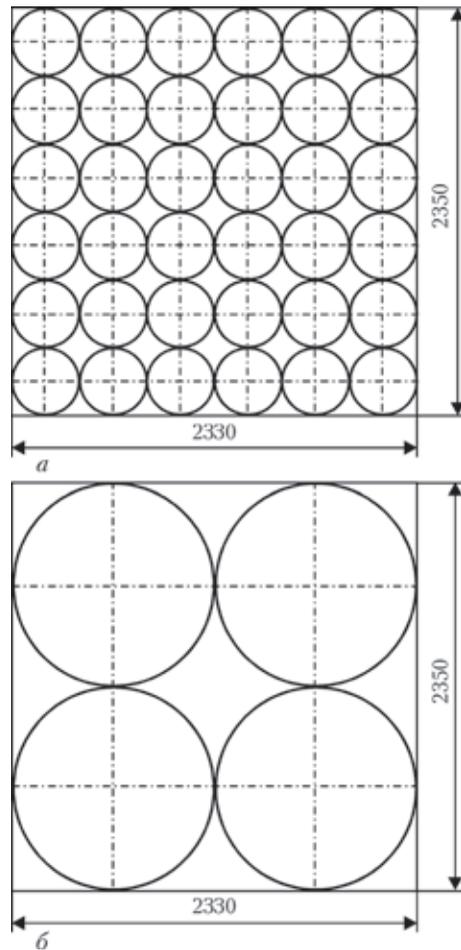


Рис. 2. Схема укомплектования контейнеров баллонами высокого давления (расположение горизонтальное): а — диаметр 390 мм; б — 1020

Следовательно, дополнительное упрочнение требуется только для цилиндрической части корпуса. Используя для этого более легкое (1,8...2,2 г/см<sup>3</sup>) сте-

Т а б л и ц а 2. Технические характеристики 20- и 40-футовых морских контейнеров и массогабаритные показатели комплектующих баллонов (материал лейнера — однонаправленный стеклопластик)

Материал оболочки	Диаметр баллонов, мм	Показатели	Рабочее давление, МПа					
			20		25		30	
			Размер контейнера, футов					
		20	40	20	40	20	40	
Термообработанная сталь 30ХГСА ( $\sigma_b = 960$ МПа)	390	$m/V$ баллона, кг/л	0,65	0,64	0,73	0,71	0,82	0,80
		Масса контейнера с баллонами, кг	15772	32232	17464	35328	19336	39324
		Объем газа в контейнере при 20°C, н.м <sup>3</sup>	4176	8814	5220	11018	6264	13222
	1020	$m/V$ баллона, кг/л	0,64	0,64	0,71	0,70	0,81	0,80
		Масса баллонов, кг	8856	19788	9824	21644	11208	24736
		Масса контейнера с баллонами, кг	11056	23688	12024	25544	13408	28636
Труба стальная ГОСТ 1078. Сталь Х80 ( $\sigma_b = 640$ МПа)	1020	Объем баллона, л	3460	7730	3460	7730	3460	7730
		$m/V$ баллона, кг/л	0,81	0,80	0,92	0,90	1,00	0,99
		Масса баллонов, кг	11160	24600	12732	27828	13840	30612
		Масса контейнера с баллонами, кг	13360	28500	14932	31728	16040	34512
		Объем газа в контейнере при 20°C, н.м <sup>3</sup>	2770	6184	3460	7730	4152	9276

Примечание: н.м<sup>3</sup> — м<sup>3</sup> при нормальных условиях.

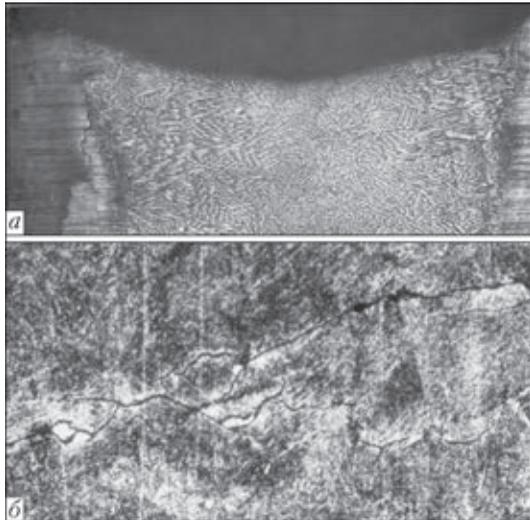


Рис. 3. Усталостные трещины в сварных соединениях стали 30ХГСА: *а* — макрошлиф сварного соединения; *б* — вторичная микроструктура сварного соединения ( $\times 300$ )

кловолокну, равнопрочное со сталью, можно на 35...40 % уменьшить массу баллона, вдвое увеличить его статическую прочность и в 3...5 раз циклическую долговечность [8]. Последнее обусловлено уменьшением влияния поверхностных концентраторов вследствие заполнения их связующим.

Современные высокопрочные стали позволяют, в зависимости от режимов термообработки,

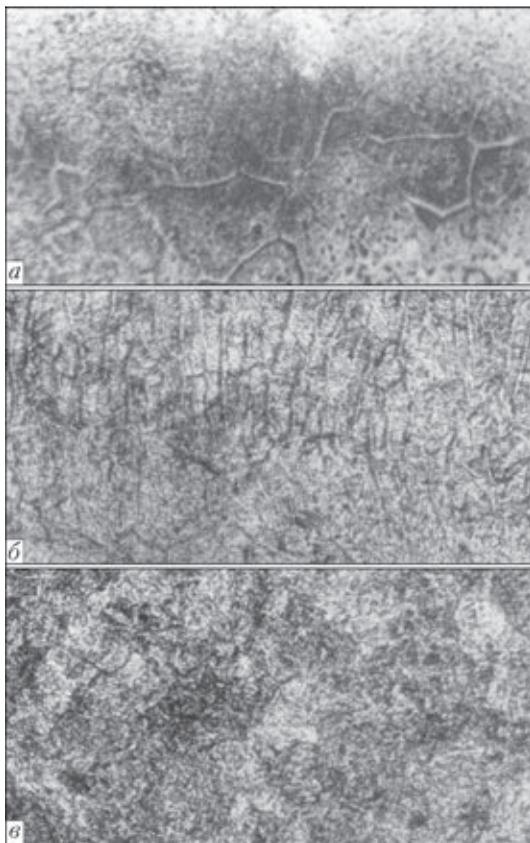


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 260$ ) сварного соединения: *а* — до закалки; *б* — после закалки; *в* — после термомеханической обработки

изменять прочностные характеристики от 600 до 2000 МПа [11]. При этом сварные соединения с идентичными по химическому составу швами в условиях статического нагружения могут быть равнопрочными с основным металлом [12]. Однако при малоцикловом нагружении ситуация изменяется. Долговечность (количество циклов нагружение–разгрузка) сварных соединений существенно зависит от локальных концентраций напряжений и микропластических деформаций вследствие повышенной по сравнению с основным металлом физической и химической неоднородностью, особенно у границы сплавления [13]. На рис. 3 представлены типичные усталостные трещины в участке перегрева пограничной зоны. Видно, что они связаны с кристаллическим строением металла, подвергавшегося воздействию термического цикла сварки. Для устранения неблагоприятных последствий этого воздействия понадобился комплекс технологических приемов улучшения структуры, включая термические циклы сварки и последующей обработки баллонов, особенно продольных швов, ориентированных перпендикулярно радиальным напряжениям.

Экспериментально установлено, что для обеспечения требуемой долговечности [14] металлопластиковых баллонов со стальными корпусами необходимо обеспечить показатели пластичности и вязкости металла не ниже  $\delta_5 \geq 12...15\%$ ,  $\alpha_H \geq 80$  Дж/см<sup>2</sup>. Комплексная термомеханическая обработка продольных швов как наиболее уязвимых и чувствительных к локальным концентрациям напряжений участков сварных корпусов улучшает их структуру (рис. 4) и обеспечивает требуемое сочетание пластичности и вязкости металла сварных соединений, увеличивая долговечность комбинированных баллонов (рис. 5).

При прочности стеклорвинга 940...1180 МПа стальная (30ХГСА) и композиционные оболочки квазиравнопрочны и при равной толщине после 15000 циклов нагружение–разгрузка сохраняют запас прочности  $\geq 2,6 \sigma_B$ . В случае использования

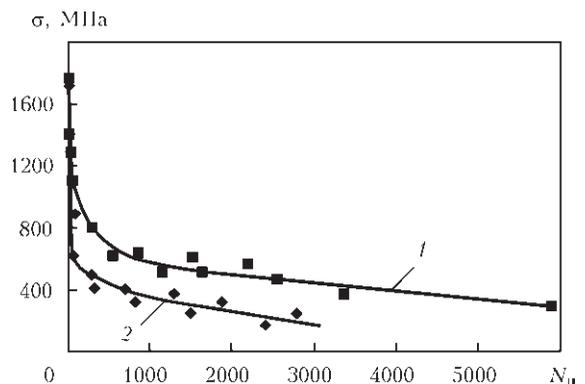


Рис. 5. Кривые работоспособности баллонов в условиях циклических нагрузок: *1* — после термомеханической обработки; *2* — после термической обработки

стали типа 09Г2С, прочность которой составляет около 490 МПа [15], для получения необходимого запаса прочности баллона требуется увеличивать толщину стенки стального корпуса почти в два раза, если усиливающая оболочка формируется только на цилиндре. Уменьшение толщины стенки корпуса баллона, как показали совместные исследования ИЭС и ИМех НАНУ, достигается формированием оболочки типа «кокон».

Реализовать намотку длинномерных баллонов в «кокон» сложно. Поэтому оптимальным решением здесь может быть либо увеличение толщины стенки трубы, либо предела прочности стали пропорционально диаметру баллона (выражения (1) и (2), рис. 6).

Высокопрочные стали типа 30ХГСА, имея высокие значения  $\sigma_b$  и  $\sigma_r$ , склонны к закалке на воздухе с образованием малопластичных структур, что при определенных условиях может вызвать образование трещин в сварных соединениях. Важно также отметить, что легированная кремнием сталь 30ХГСА имеет теплопроводность почти в 2,4 раза ниже таковой у железа [15, 16]. Это снижает интенсивность отвода тепла из зоны сварки и увеличивает продолжительность пребывания металла в интервале высоких температур, что усиливает развитие химической микронеоднородности металла шва, которая снижает механические свойства металла и его сопротивляемость образованию и развитию трещин [12, 17]. Поэтому целесообразность предварительного и сопутствующего подогревов стали 30ХГСА при сварке сомнительна. Более полезным, как показали исследования, является увеличение скорости охлаждения выше точки  $A_{(r)}$  и некоторое замедление охлаждения соединения при температурах завершения распада аустенита с целью самоотпуска продуктов распада и повышения их пластичности.

Опыт сварки и термообработки сталей указанной группы [18–20] подтверждает, что отказ от подогрева позволяет формировать в соединениях мелкозернистые структуры мартенсита отпуска или бейнитно-мартенситной смеси только за счет параметров термического цикла сварки. Одним из методов решения этой проблемы является использование режимов сварки с повышенными ( $\geq 500$  °C/с) скоростями нагрева металла, что достигается либо увеличением концентрации энергии в дуге, либо сокращением длительности нагрева при использовании дуги с более низкой концентрацией.

Эффективным средством повышения концентрации нагрева являются активирующие флюсы [21, 22]. Тепловая мощность дуги при сварке плавящимся электродом обычно в 2-3 раза выше, чем неплавящимся — при одинаковых сварочных

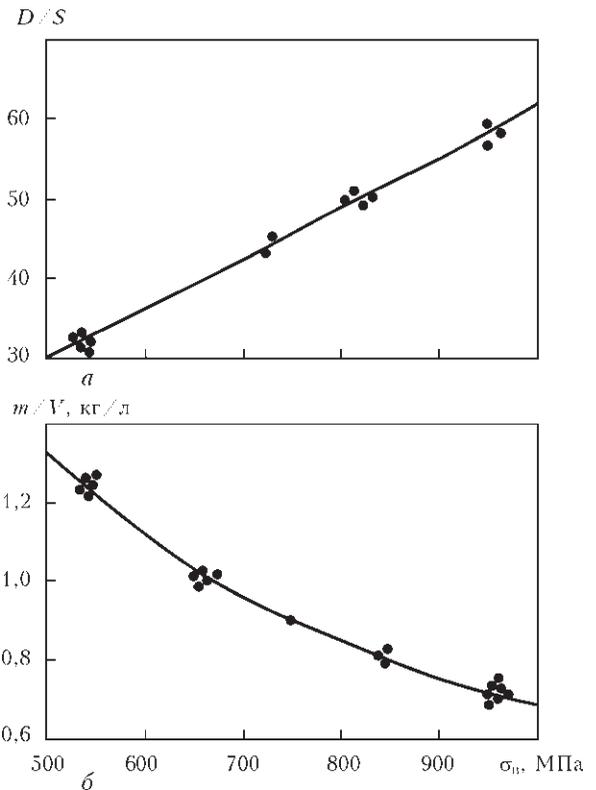


Рис. 6. Влияние прочности стали на соотношение диаметра трубы к толщине стенки (а) и массы баллона к его объему (б) токах. Поэтому для получения равнозначного эффекта неплавящимся электродом с активирующим флюсом выполняют со скоростями примерно в 2-3 раза меньшими, чем сварку плавящимся электродом в защитных газах с активирующим флюсом. При этом максимальное влияние на кинетику формирования структуры в первом случае достигается при толщине металла до 6 мм, когда скорости нагрева металла составляют  $\geq 600...700$  °C/с. С увеличением толщины металла скорости нагрева при сварке неплавящимся электродом с активирующим флюсом резко снижаются, поэтому целесообразно выполнять сварку плавящимся электродом в защитных газах с активирующим флюсом. Она позволяет сваривать за один проход металл толщиной 10...20 мм, со скоростями нагре-

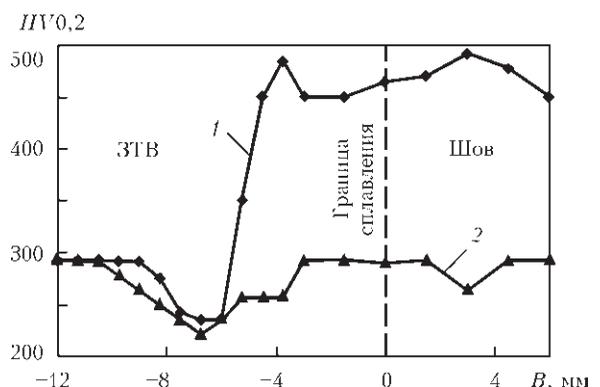


Рис. 7. Влияние местного отпуска на микротвердость в металле шва и ЗТВ: 1 — после сварки; 2 — после местного отпуска



Таблица 3. Варианты баллонов для грузовой системы специализированных КПП-газовозов (планируемая масса трубопроводов на судне 85,5 тыс. т)

Параметр	$K_3$			
	2,5		1,75	
	$\sigma_R$ , МПа			
	640	960	640	960
Типоразмер труб	МП1220×27,06	МП1220×18,04	МП1220×18,3	МП1220×12,2
Длина трубопроводов на судне, км	77,2203	07,9273	106,4463	145,0136

Таблица 4. Техничко-экономические показатели морской транспортировки 10 млрд м<sup>3</sup> газа в год на расстояние 1 тыс. км

Агрегатное состояние газа	Инвестиции, млн дол. США (место)		Эксплуатационные затраты, млн дол.				Сумма затрат за 20 лет [2]+[6], млн дол. (место)	
			За 1 год (место)		За 20 лет (место)			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
NgH (кристаллогидраты)	2644 (V)		606 (V)		12120 (V)		14764 (V)	
LNg (сжиженный газ)	2030 (IV)		243 (II)		4860 (II)		6890 (III)	
CNg (сжатый газ, $K_3 = 1,75$ )	1348 (II)		210 (I)		4200 (I)		5548 (I)	
CNg (сжатый газ, $K_3 = 2,5$ )	1771 (III)		282 (IV)		5720 (IV)		7491 (IV)	
CNg (аренда контейнеровозов)	1251 (I)		270 (III)		5400 (III)		6651 (II)	

ва  $\geq 3000$  °C/с, что существенно уменьшает время пребывания металла в области высоких температур в период нагрева, а также сокращает объемы перегретого металла.

Известно, что увеличение скоростей нагрева высокопрочного металла сопровождается ускоренным его охлаждением и, следовательно, закалкой с образованием зоны повышенной твердости (рис. 7, кривая 1). Твердость металла в зоне при этом превышает твердость термоулучшенного основного металла в 1,5...2,0 раза. Поэтому для судов высокого давления, в соответствии с требованиями [14], предусмотрен местный отпуск сварных соединений. Его задача максимально нивелировать разницу между твердостью упрочненного до 900...1000 МПа металла и твердостью металла шва и ЗТВ (рис. 7, кривая 2). При этом, как следует из приведенного рисунка, зона разупрочнения практически не изменяет своих характеристик, но и не выходит за пределы допустимых твердости и прочности, т. е. ее работоспособность соизмерима с таковой у основного металла. По абсолютному значению прочность металла в зоне разупрочнения ниже прочности основного металла всего на  $\leq 10$  %, а ударная вязкость при этом выше почти в 2 раза. Исследования штампован-

Таблица 5. Рейтинг способов морской транспортировки 10 млрд м<sup>3</sup> природного газа в год в зависимости от дальности перевозок

Агрегатное состояние газа	Дальность перевозок, км				
	620	1000	2000	3000	5000
NgH (кристаллогидраты)	V	V	V	V	V
LNg (сжиженный газ)	IV	III	II-I	I	I
CNg (сжатый газ, $K_3 = 1,75$ )	I	I	I-II	II	II
CNg (сжатый газ, $K_3 = 2,5$ )	III	IV	IV	IV	IV
CNg (аренда контейнеровозов)	II	II	III	III	III

ных днищ показало, что локальное снижение запаса прочности в указанных пределах не влияет на работоспособность изделия. Кроме того, увеличение на 15 % рабочих нагрузок при испытании баллонов не приводит к уменьшению их запаса прочности. Это может служить предпосылкой для повышения рабочего давления в баллонах, при котором расчетный запас прочности можно допустить до 1,75. Это позволит лучше использовать резервы, заложенные в конструкции баллонов за счет того, что в расчетах обычно принимаются минимальные показатели механических свойств, полученные при одноосном растяжении. В условиях двухосного растяжения они выше. Характеристики баллонов с запасами прочности 2,5 и 1,75 представлены в табл. 3.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработаны алгоритм и необходимое программное обеспечение, позволяющие выполнять многофакторную технико-экономическую оценку предлагаемых вариантов транспортировки газа, определять необходимые капитальные и эксплуатационные затраты в зависимости от объемов и дальности транспортировки газа, его агрегатного состояния, размера судов и типа грузовой системы газозовов, акватории плавания, условия прохождения проливов и каналов, портовых и прочих сборов.

Капиталовложения включали постройку приемного терминала (его береговой и рейдовой части), строительство необходимого количества танкеров. Кроме строительства новых судов были рассмотрены варианты аренды, в том числе с их переоборудованием и установкой газотранспортной системы.

Рассматривались следующие варианты

маршрутов доставки газа различной дальности, в том числе с морских скважин на Азово-Черноморском шельфе (220 км), в пределах акватории Черного моря (Супса–Феодосия, 620 км), варианты с выходом за пределы Черного моря: Египет — Ильичевск (1971 км); Шкикда — Ильичевск (2843 км); Шарджи — Ильичевск (7384 км).

Рассматривались варианты транспортировки кристаллогидратов (NgH), сжиженного газа (LNg), сжатого газа (CNg) с коэффициентами запаса прочности судовой газотранспортной системы  $K_3 = 2,5$  и  $1,75$  и аренды судов для контейнерной перевозки сжатого газа. Результаты расчетов, проведенных в табл. 4, 5, позволили сделать следующие выводы.

Для обслуживания Азово-Черноморского шельфа однозначно может быть рекомендована транспортировка сжатого газа (КПГ). Капиталовложения и годовые текущие затраты при этом в 1,5...2,0 раза ниже, чем при сжиженном газе.

При увеличении плеча транспортировки до 620 км (что включает все возможные маршруты в пределах акватории Черного моря) преимущество сжатого газа перед сжиженным по капиталовложениям составляет 1,2 раза, а текущие затраты практически выравниваются.

Для вариантов, связанных с выходом за пределы Черного моря через Босфор, Дарданеллы, а тем более за пределы Средиземного моря через Суэцкий канал, однозначно может быть рекомендован вариант транспортировки газа в сжиженном состоянии. На плече 2000 км сохраняется еще равенство капиталовложений, но текущие затраты снижаются на 10 %. Соответственно на плече 3000 км капиталовложения и текущие затраты снижаются на 15 %, на плече более 7000 км капиталовложения снижаются на 40 %, а текущие затраты на 30 %.

1. *Метан* – топливо 21 века! [www.neoplan.ru/news/Metan.16.05.2012](http://www.neoplan.ru/news/Metan.16.05.2012).
2. *Як оцінюють* майбутнє газовидобутку в Україні. Українська енергетика 23.05.2013. <http://ua-energy.org/post/32050>. – С. 4.
3. *Стан і перспективи розвитку нафтогазового комплексу України* // І. М. Карп, Д. О. Єгер, Ю. О. Зарубін та ін. – Київ: Наук. думка, 2006. – 305 с.

4. *Вотинцев А. В.* Транспортировка сжатого природного газа // Газовая пром-сть. – 2007. – № 2. – С. 62–63.
5. *Рен Ч. Г., Зеленовская Е. В.* Обзор существующих методов транспортировки природного газа на дальние расстояния и оценка их применимости // Нефть, Газ и Бизнес. – 2011. – № 3. – С. 3–9.
6. *Морская транспортировка сжатого природного газа* // Морская биржа. – 2006. – № 2(16) – С.65–69.
7. [www.uh.edu/news-events/media-publications](http://www.uh.edu/news-events/media-publications).
8. *Патон Б. Е., Савицкий М. М., Савиченко А. А.* Конструкция и технология изготовления баллонов высокого давления // Автомат. сварка. – 1995. – № 9. – С. 5–8.
9. *Определение параметров облеженных стальных баллонов для грузовой системы CNG-газовозов* / М. М. Савицкий, А. М. Савицкий, В. А. Супруненко и др. // Вісник НУК. Електронне видання. – 2013. – № 1. – С. 4–14.
10. *Декларац.* пат. на корисну модель 67664 Україна, МПК F17C 5/00 Спосіб транспортування стиснутого природного газу рухомим трубопроводом / Б. Є. Патон, Є. І. Крижанівський, М. М. Савицький та ін.; Заяв. 08.12.11; Опубл. 27.02.12; Бюл. № 4.
11. *Потак Я. М.* Высокопрочные стали. – М.: Металлургия, 1972. – 208 с.
12. *Макара А. М.* О равнопрочности сварных соединений высокопрочных сталей // Новые проблемы сварочной техники. – Київ: Техніка, 1964. – С. 247–268.
13. *Труфяков В. И.* Усталость сварных соединений. – Киев: Наук. думка, 1973. – 215 с.
14. *Правила будови та безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском.* – К.: Основа, 2007. – 373 с.
15. *Марочник сталей и сплавов* / Под ред. В. Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
16. *Зиновьев Б. Е.* Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: Справочник. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
17. *Стеренбоген Ю. А., Петров П. Ф.* Влияние температурного интервала кристаллизации на склонность сталей к образованию кристаллизационных трещин при сварке // Автомат. сварка. – 1979. – № 7. – С. 10–13.
18. *Влияние* стадии нагрева на формирование структуры сварных соединений закаливающихся сталей / А. М. Савицкий, В. Г. Васильев, М. М. Савицкий, В. Н. Вашенко // Там же. – 2005. – № 1. – С. 19–21.
19. *Савицький О. М.* Вплив швидкісних нагрівів на структуру вуглецевих сталей при локальній термічній дії // Металознавство та обробка металів. – 2005. – № 4. – С. 33–35.
20. *Физические основы электротермического упрочнения сталей* / В. Н. Гриднев, Ю. Я. Мешков, С. П. Ошкадеров, В. И. Трефилов. – Киев: Наук. думка, 1973. – 336 с.
21. *Дудко Д. А., Савицкий А. М., Савицкий М. М.* Сварка плавящимся электродом в защитных газах с применением активирующего флюса // Автомат. сварка. – 1996. – № 10. – С. 54–55.
22. *Применение* активных флюсов и активных газов для повышения эффективности дуговой и плазменной сварки / Б. Е. Патон, М. М. Савицкий, В. С. Гвоздецкий и др. // Там же. – 2003. – № 5 – С. 3–6.

Поступила в редакцию 09.04.2014



## ИЗНОСОСТОЙКАЯ ДУГОВАЯ НАПЛАВКА ПО СЛОЮ ЛЕГИРУЮЩЕЙ ШИХТЫ

В. В. ПЕРЕМИТЬКО

Днепродзержинск. гос. техн. ун-т. 51918, г. Днепродзержинск, ул. Днепростроевская, 2. E-mail: welding@dstu.dp.ua

Приведены результаты изучения структуры, твердости и относительной износостойкости поверхностных слоев деталей, восстановленных дуговой наплавкой под флюсом с добавлением порошковых материалов и наложением внешнего магнитного аксиального поля. Используя порошки карбида кремния SiC и аэросила SiO<sub>2</sub>, готовили пастообразную смесь на основе грунтовки ГФ-021, которую наносили валиками вдоль направления наплавки. При проведении экспериментов варьировали составом смеси, количеством наносимых слоев, эксцентриситетом в расположении слоев относительно оси электродной проволоки, а также индукцией внешнего магнитного поля. Исходя из полученных результатов, самая высокая твердость наплавленного металла наблюдается при  $B = 10 \dots 50$  мТл. Оптимальный шаг в наложении слоев — 4...6 мм. Твердость растет при увеличении количества наносимых слоев. Представлены регрессионные уравнения указанных зависимостей. За счет внешнего магнитного поля стало возможным уменьшение теплового воздействия на вводимые порошковые материалы без расплавления их частиц. Анализ микроструктур свидетельствует о влиянии магнитного поля на кристаллизацию. Произошло равномерное распределение частиц порошкового материала в наплавленном металле, балл зерна достиг 10...12 против исходных 6...8. Испытания на износ выявили наименьшие потери массы образцов, наплавленных с введением частиц SiO<sub>2</sub>. При этом происходит допустимая пластическая деформация и максимальное повышение твердости поверхностных слоев. Библиогр. 8, табл. 4, рис.4.

*Ключевые слова:* дуговая наплавка под флюсом, внешнее магнитное поле, порошки SiC и SiO<sub>2</sub>, смеси на основе грунтовки, анализ микроструктуры, твердость, регрессионные зависимости, износостойкость

Практика восстановительной наплавки деталей в различных отраслях промышленности предопределила множество направлений развития и совершенствования способов традиционной дуговой наплавки плавящимся электродом. В разное время предложены технологии и оборудование, позволяющие увеличить производительность наплавки, обеспечить возможность нанесения слоев в многослойных покрытиях в различных пространственных положениях и различного химического состава, в том числе композиционных [1].

При общей тенденции использования для восстановления и упрочнения деталей недефицитных и недорогих наплавочных материалов основную сложность представляет достижение высокой износостойкости восстанавливаемых контактных поверхностей. Повышение эксплуатационных характеристик наплавленного рабочего слоя обычно достигается выбором и оптимизацией химического состава электродных или присадочных наплавочных материалов и, в случае необходимости, последующей термической обработкой [1–5].

С целью увеличения срока эксплуатации деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания, провели усовершенствование установки для автоматической дуговой наплавки под флюсом, разработали технологию наплавки по слою легирующей шихты, выполнили наплавку образцов по разработанной технологии, исследовали

микроструктуру и износостойкость наплавленных образцов.

Суть предложенных изменений заключается в том, что при наплавке на сварочную дугу накладывалось управляющее аксиальное магнитное поле, которое оказывает тормозящее действие на скорость потоков жидкого металла в ванне и уменьшает глубину проплавления основного металла [6–8]. Наложение внешнего магнитного поля также обеспечивает увеличение поперечных размеров сварочной ванны, что дает возможность наносить порошковую присадочную шихту со смещением ее расположения от оси дуги в той области сварочной ванны, где температура жидкого металла относительно невысока. Последнее важно с точки зрения недопущения полного расплавления дисперсного материала, вводимого для измельчения структуры наплавленного металла и повышения его износостойкости. В качестве дисперсных материалов использовали карбид кремния SiC и аэросил SiO<sub>2</sub> с размером частиц не более 200 мкм. Аэросил — коллоидный диоксид кремния, очень легко измельчаемый порошок, техническое название — пирогенный диоксид кремния.

Для улучшения условий внесения и повышения эффективности влияния, порошки карбида кремния и аэросила смешивали с порошком железа (Fe+SiC, Fe+SiO<sub>2</sub>). Это позволило улучшить усвоение порошков наплавленным металлом и обеспечить их более равномерную концентрацию

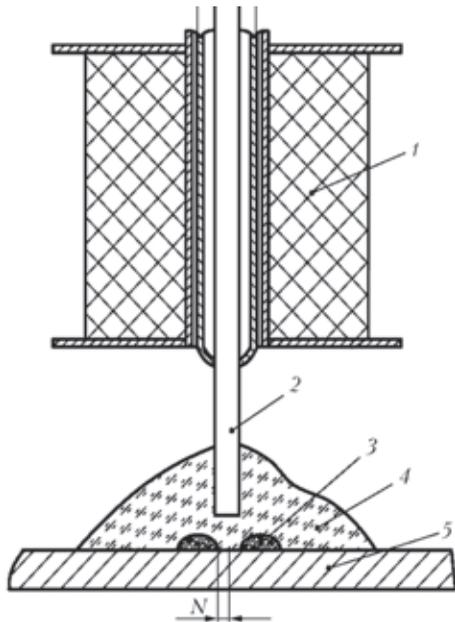


Рис. 1. Схема автоматической дуговой наплавки под флюсом по легирующей шихте, расположенной вне зоны действия дуги, с наложением на дугу магнитного поля: 1 — катушка, создающая магнитное поле; 2 — проволока; 3 — слой легирующей шихты; 4 — флюс; 5 — наплавляемый образец; N — расстояние от центра дуги до слоя легирующей шихты

по длине наплавленного валика. Для большей равномерности попадания порошкового материала в наплавляемый валик готовили пастообразную смесь на основе грунтовки ГФ-021, которую наносили вдоль линии последующей наплавки с шагом в поперечном направлении 4...10 мм (рис. 1).

Поскольку порошковые материалы отличаются параметрами (форма, насыпная масса), экспериментальным путем были определены оптимальные пропорции и расход порошков на единицу длины шва. Полученные данные сведены в табл. 1.

Наплавку образцов из стали 45 выполняли под флюсом АН-348А проволокой Св-08А диаметром 3 мм на установке типа УД-209. Режим наплавки: ток 400 А, напряжение 32...36 В, скорость подачи проволоки 160 м/ч, скорость наплавки 12...16 м/ч, шаг наплавки 6...8 мм, ток постоянный, полярность обратная. Для изучения структуры и измерения твердости из наплавленных заготовок вырезали плоские образцы толщиной 15 мм, а для испытания на изнашивание — цилиндрические, с

Таблица 1. Пропорции смесей и их расход на единицу длины шва

Номер смеси	Состав смеси	Соотношение компонентов в смеси	Расход порошка на валик длиной 15 см, г
1	SiC + Fe	0,04:1,0	0,06
2		0,08:1,0	
3		0,12:1,0	
4	SiO <sub>2</sub> + Fe	0,15:1,0	0,5
5		0,30:1,0	
6		0,45:1,0	

внешним диаметром от 30 до 50 мм и толщиной 10 мм.

Изменяя расстояние N, режимы наплавки и характеристики магнитного поля, можно добиться того, что относительно тугоплавкие частицы легирующей шихты не полностью расплавляются в сварочной ванне и после кристаллизации наплавленного металла будут находиться в нем в свободном состоянии.

При проведении экспериментов выполняли центральное некомпозиционное планирование второго порядка для четырех факторов — состава смеси, количества наносимых слоев смеси (наносились один на один, после высыхания предыдущего), эксцентриситета в расположении слоя относительно оси горелки, индукции внешнего магнитного поля. Обработка экспериментальных данных была проведена с помощью математического пакета STATISTICA 6.0. Определение твердости проводили на твердомере ТК-2. Исходя из полученных результатов, самые высокие показатели твердости наплавленного металла наблюдаются при магнитной индукции B = 20...50 мТл (табл. 2).

Регрессионные уравнения зависимостей твердости для двух типов смесей имеют вид

$$HB = 156,974 + 29,190[c] + 22,605n - 2,638[c]^2 - 4,721[c]n - 1,829n^2, \quad (1)$$

$$HB = 177,856 + 15,427N - 0,176B - 0,962N^2 - 0,039NB + 0,002B^2. \quad (2)$$

Уравнение (1) позволяет рассчитывать твердость наплавленного металла при использовании смеси SiC + Fe. Эта смесь дает наибольший рост твердости ([c] — концентрация SiC в смеси, фактически выраженная ее номером). Уравнение (2),

Таблица 2. Результаты определения твердости наплавленного металла образцов

Номер образца	Номер смеси	N, мм	Количество наносимых слоев смеси	B, мТл	HB
1	Без внесения порошков	7	—	80	213,5
2	»»	4	—	20	217,6
3	6	10	2	50	223,0
4	5	4	2	50	230,2
5	1	10	2	50	215,0
6	2	4	2	50	219,7
7	4	7	2	80	214,5
8	5	7	2	20	220,0
9	3	7	2	80	219,7
10	3	7	2	20	235,6
11	2	7	3	50	220,9
12	4	7	1	50	219,1
13	3	7	3	50	229,0
14	3	7	1	50	227,6

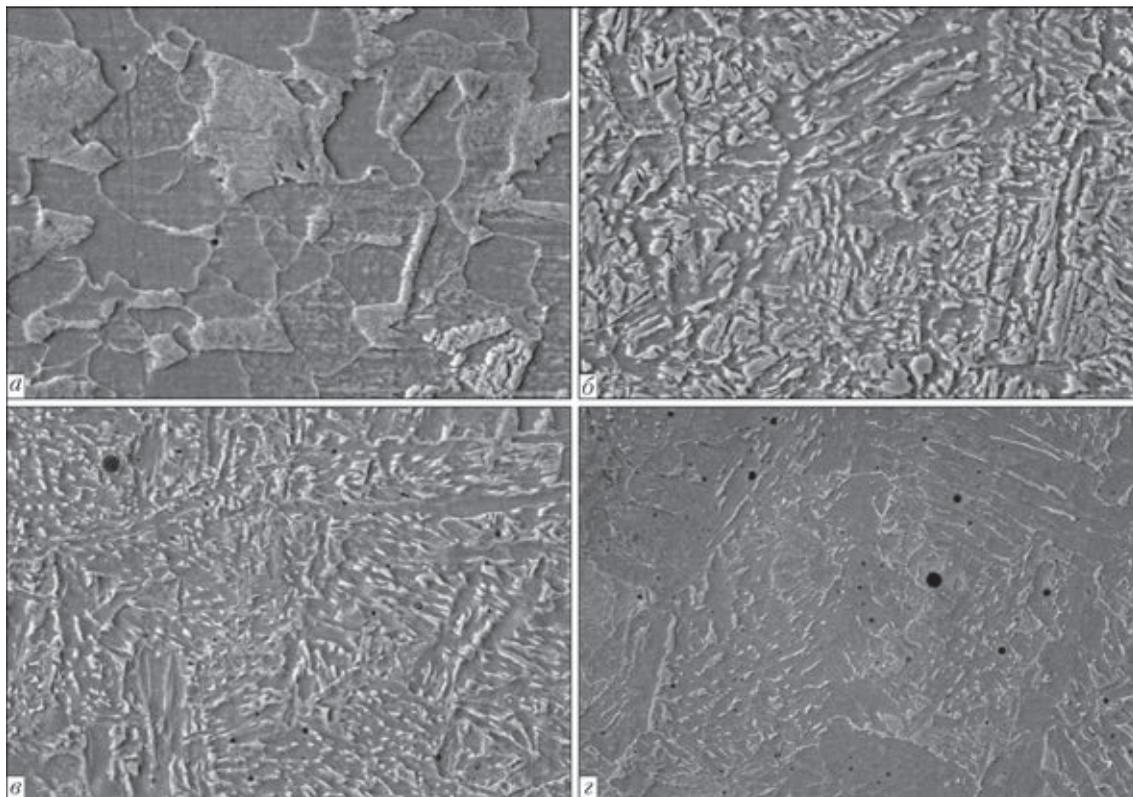


Рис. 2. Структура ( $\times 1000$ ) наплавленного металла образцов: *a* — основной металл (сталь 45); *б* — 3ТВ; *в, з* — наплавленный металл со смесью порошков ( $\text{SiC} + \text{Fe}$ ) и ( $\text{SiO}_2 + \text{Fe}$ ) (черные точки — частицы  $\text{SiC}$  и  $\text{SiO}_2$  соответственно)

соответственно, позволяет рассчитывать твердость наплавленного металла при использовании смеси  $\text{SiO}_2 + \text{Fe}$ .

Твердость растет при смене состава смесей порошков в такой последовательности: (без порошка)  $\langle \text{Fe} + \text{SiO}_2 \rangle \langle \text{Fe} + \text{SiC} \rangle$  и увеличении количества  $n$  наносимых слоев порошковых материалов до трех ( $1 < 2 < 3$ ). Двукратное применение порошка увеличивает твердость наплавленного металла в 1,5 раза, а трехкратное — в 1,05 раза по сравнению с двукратным. Оптимальное смещение слоев легирующей шихты  $N$  от центра шва находится в пределах 4...6 мм.

Из наплавленных заготовок были изготовлены образцы для исследования микроструктуры и износостойкости наплавленного металла.

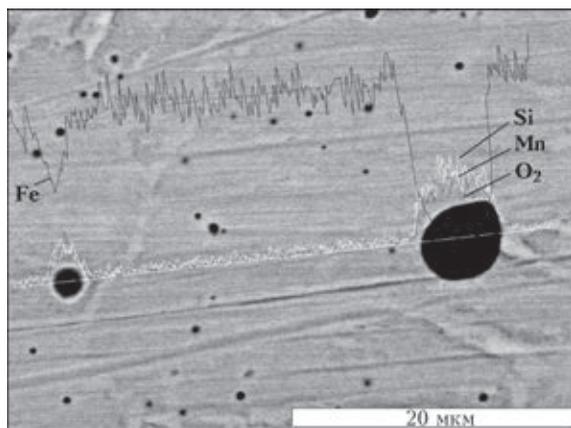


Рис. 3. Схема сканирования наплавленного металла образцов

Анализ микроструктур свидетельствует о положительном влиянии магнитного поля на кристаллизацию наплавленного металла (рис. 2, *a, б*). Вследствие интенсивного перемешивания при наложении магнитного поля ферритно-перлитные зерна имеют разориентированную направленность. Кроме того, наплавленный металл имеет очень мелкую структуру — балл зерна наплавленного металла составляет 10...12. Это объясняется влиянием магнитной индукции и присутствием нерасплавившихся частиц диоксида и карбида кремния, которые достаточно равномерно распределены в наплавленном металле.

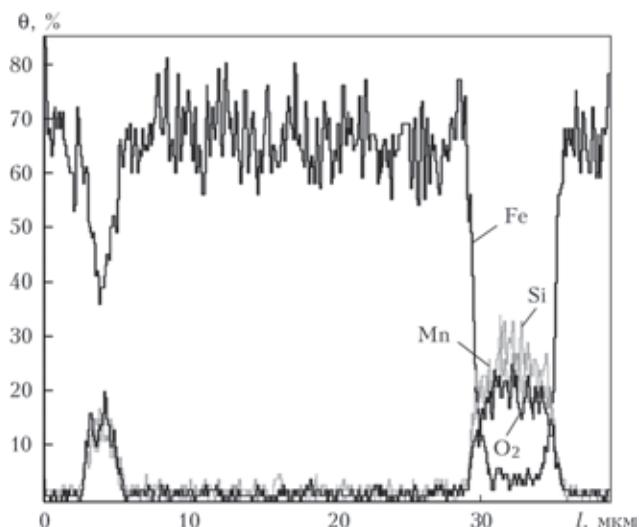


Рис.4. Распределение элементов по линии сканирования

Таблица 3. Химический состав дисперсных включений, мас. %

Номер смеси	C	O	Al	Si	S	Ti	Mn	Fe
3	14,74	35,72	4,61	15,14	1,18	0,30	26,81	1,49
6	7,15	33,08	2,56	17,76	0,97	0,28	31,59	6,61

Таблица 4. Результаты исследования износостойкости наплавленного металла образцов

Номер смеси	Твердость поверхностного слоя, <i>HV</i>		Потеря массы, г	
	до испытания	после испытания	на ролик, ведущий/ведомый	на контактную пару
Без введения порошков	213,5	220	0,12170/0,08485	0,20655
3	235,6	269	0,06929/0,05520	0,12449
6	223	285	0,05345/0,02925	0,08270

Идентификацию включений проводили с помощью энергодисперсионного анализатора на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO50 (рис. 3, 4). Детальное изучение структурных составляющих выполняли на глубине 2, 4 и 6 мм от поверхности валика на участках шириной 5 мм симметрично его оси. Характер распределения дисперсных включений, а также их количество во всех случаях оставались приблизительно одинаковыми. Размер частиц уменьшился на порядок. Самые крупные из них имели линейные размеры в пределах 10 мкм. Полученные данные (табл. 3) свидетельствуют о том, что частицы частично сохранили свой химический состав.

Были проведены исследования износостойкости наплавленного металла на установке МИ-1М по схеме «ролик-ролик» (время изнашивания — 2 ч, усилие прижатия роликов — 1 кН, табл. 4).

Как видно, максимальная потеря массы и минимальная износостойкость наблюдались в контактной паре, наплавленной без внесения порошков. Наплавленный металл имел минимальную твердость, износ шел с пластическим деформированием и отслоением поверхностных слоев. Более высокую износостойкость имела пара трения образцов, наплавленных по шихтовой смеси с частицами SiC.

Хотя твердость образцов этого типа до и после испытаний были выше, чем у неупрочненных образцов, но их износ проходил без значительного пластического упрочнения. Лучший результат показали образцы, наплавленные по шихте с частицами аэросила. Они в большей степени упрочнялись в процессе изнашивания и имели наивысшую твердость после испытаний.

### Выводы

1. Предложена схема дуговой наплавки по слою легирующей шихты, с наложением на дугу внешнего

магнитного поля, которая позволяет существенно — в 1,8...2,2 раза — увеличить износостойкость наплаваемого металла при использовании нелегированной проволоки и распространенных флюсов, а также порошков диоксида и карбида кремния.

2. Определены оптимальные параметры подачи легирующей шихты относительно центра дуги (магнитная индукция 20...50 мТл, смещение слоев шихты относительно оси дуги — 4...6 мм) при которых достигаются максимальное снижение потерь массы образцов при износе (от 0,2065 до 0,0827 г) и измельчение зерна наплавленного металла.

3. Локальным анализом дисперсных включений подтверждено, что нерасплавившиеся частицы сохранили в основном свой состав (Si до 17,76 %, C до 14,74 %, O<sub>2</sub> до 35,72 %) при значительном — на порядок — уменьшении линейных размеров.

1. Рябцев И. А., Сенченков И. К. Теория и практика наплавочных работ. — Киев: ЕкоТехнологія, 2013. — 400 с.
2. Чигарев В. В., Малинов В. Л. Выбор экономнолегированных наплавочных материалов для различных условий ударно-абразивного воздействия // Автомат.сварка. — 2000. — № 5. — С. 58–60.
3. Восстановление и повышение износостойкости и срока службы деталей машин / Под ред. В. С. Попова. — Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2000. — 394 с.
4. Лившиц Л. С., Гринберг Н. А., Куркумелли Э. Г. Основы легирования наплавленного металла. — М.: Машиностроение, 1969. — 188 с.
5. Фруммин И. И. Автоматическая электродуговая наплавка. — Харьков: Металлургиздат, 1961. — 421 с.
6. Размышляев А. Д., Миронова М. В. Магнитное управление формированием валиков и швов при дуговой наплавке и сварке. — Мариуполь: Приазов. гос. техн. ун-т, 2009. — 196 с.
7. Рижов Р. М., Кузнецов В. Д. Магнітне керування якістю зварних з'єднань. — К.: ЕкоТехнологія, 2010. — 288 с.
8. Перемитько В. В. Разработка и исследование технологии восстановительной наплавки катков ходовой части гусеничных машин // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: Теория и практика: В 2 ч. Ч. 1. Материалы 15-й Междунар. науч.-практ. конф. — С.-Пб: Изд-во политехн. ун-та, 2013. — С. 168–172.

Поступила в редакцию 17.03.2014



## ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ



**О. С. Кушнарева** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины) защитила 24 июня 2014 г. кандидатскую диссертацию на тему «Особенности структуры и конструктивная прочность сварных соединений алюминиевых сплавов системы легирования Cu–Li–Sc».

Диссертационная работа посвящена исследованию влияния изменения структуры и фазового состава металла сварных соединений алюминий-литиевого сплава 1460 в зависимости от характера легирования присадочной проволокой (без и со скандием) в состоянии после сварки и термообработки (старение при  $T = 150\text{ }^\circ\text{C}$ , 22 ч и отжиг при  $T = 350\text{ }^\circ\text{C}$ , 1 ч) и в результате внешнего нагружения.

С использованием комплекса методов (световая, аналитическая растровая и просвечивающая электронная микроскопия) проведено исследование параметров структуры сварных соединений: изменение зеренной и субзеренной структуры, микротвердости, химического состава, характера разрушения, плотности дислокаций, выделения упрочняющих фаз. Выполнена аналитическая оценка свойств сварных соединений, основанная на учете вклада формирующейся структуры и ее параметров. Установлено, что легирование сварных соединений скандия при всех технологических операциях (сварка, термообработка) вызывает изменение структурно-фазового состояния. Наибольший эффект наблюдается при отжиге, когда существенно измельчается не только зеренная структура (как после сварки), но и увеличивается плотность дислокаций, активизируется формирование субструктуры и образование фаз (оптимального размера, объемной доли и равномерного внутризеренного распределения). Нивелируется характерная для Al–Li сплавов проблема формирования протяженных зернограничных эвтектик и зон свободных от выделений. Установлено, что легирование скандием способствует повышению предела текучести сварного соединения на 29...32 % после отжига, наибольший вклад в упрочнение вносят фазовые образования (32 % — металл шва, 26 % — металл ЗТВ), субструктура (29 % — металл шва и 30 % — металл ЗТВ) и величина зерна (20 % — металл шва, 19 % — металл ЗТВ). Максимальный вклад в дисперсионное упрочнение металла шва при легировании скандием после отжига вносят фазы  $\text{Al}_2\text{Cu}$  (20 %),  $\text{Al}_3\text{Sc}$  (20 %).

Выполнена аналитическая оценка распределения локальных внутренних напряжений ( $\tau_{л/вн}$ ) в сварных соединениях после отжига. При динамическом нагружении в металле шва в отсутствие добавок скандия формируются полосы сдвига, являющиеся источником образования протяженных концентраторов локальных внутренних напряжений вдоль границ и способствующие формированию градиентов по границам полос ( $0,34...0,85\tau_{теор}$ ) и их внутренних объемов ( $0,003...0,0085\tau_{теор}$ ). Это является одной из причин трещинообразования. В случае легирования скандием в металле шва образуются выделения, состоящие из ядра  $\text{Al}_3\text{Sc}$  и оболочки  $\text{Al}_3\text{Li}$ , а также на основе  $\text{Al}_2\text{Cu}$  композитного типа (с 15...40 %  $\text{Al}_3\text{Sc}$ , которые способствуют фрагментации структуры и более равномерному распределению локальных внутренних напряжений ( $0,34...0,21\tau_{теор}$ ). Это увеличивает возможности пластической релаксации напряжений в металле шва за счет подключения ротационных механизмов к дислокационным при одновременном повышении прочности и технологической пластичности сварных соединений.



**П. В. Гончаров** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины) защитил 27 июня 2014 г. кандидатскую диссертацию на тему «Технология дуговой точечной сварки низколегированных сталей в вертикальном положении».

Диссертация посвящена разработке технологии дуговой точечной сварки (ДТС) в вертикальном положении тонколистовых ( $\delta = 1,5...5,0$  мм) сварных нахлесточных соединений из низколегированных сталей без предварительной пробивки отверстий в привариваемом лицевом элементе конструкций.

Разработана технология получения дуговых точечных соединений в вертикальном положении без предварительной пробивки отверстий в лицевом элементе конструкций с толщиной 1,5...5,0 мм, а также создано оборудование для его реализации. За счет периодического изменения тока и напряжения в режимах сварки на технологических этапах общего цикла сварки выполняется порционное внесение электродного металла в сварочную ванну при формировании сварного соединения объемом, который удерживается силами поверхностного натяжения от стекания с вертикальной плоскости и контроля за количеством тепла, вносимого дугой в сварное соединение.



С помощью математического моделирования изучены особенности управления теплодеформационным состоянием при изменении режимов ДТС, что позволяет сократить количество экспериментов при подборе оптимальных параметров этого режима в вертикальном положении. На основе данных о размерах зоны сплавления и уровней остаточных напряжений в зоне сварной точки была выполнена оценка работоспособности точечного сварного соединения при статических и переменных нагрузках.

Установлено, что за счет чередования этапов нагрева и охлаждения сварных соединений происходит измельчение структуры металла шва в 2...2,5 раза, исключается образование закалочных струк-

тур при сварке низколегированных сталей типа 09Г2С и уменьшается ширина зоны термического влияния по сравнению с традиционной ДТС в 1,5 раза.

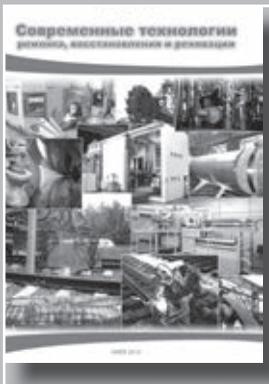
Разработаны практические рекомендации относительно использования предложенной технологии при сварке конструкционных сталей толщиной от 1,5 до 5,0 мм в вертикальном положении.

Предложена эффективная методика контроля качества полученных точечных соединений методом электронной широгрaфии, которая позволяет выполнять неразрушающий контроль тонколистовых конструкций, изготовленных с использованием дуговых точечных соединений.

## ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ПАТОН»

[www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com)

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА, ВОССТАНОВЛЕНИЯ И РЕНОВАЦИИ.** – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2012. – 172 с. Мягкий переплет, 200×290 мм.



Сборник включает 38 статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» за период 2009–2011 гг., по проблемам ремонта, восстановления и реновации изделий ответственного назначения. Авторами статей являются известные в Украине ученые и специалисты в области сварки, наплавки, упрочнения, металлизации и других технологий ревитализации. Сборник предназначен для научных сотрудников, инженеров, технологов, конструкторов и аспирантов, занимающихся проблемами сварки и других родственных технологий обработки материалов.

*Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала «Автоматическая сварка»*

## ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ПАТОН»

[www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com)

**СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.** – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2014. – 168 с. Мягкий переплет, 200×290 мм.



Сборник включает 28 статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» за период 2011–2013 гг., по проблемам разработки, изготовления и применения сварочных материалов, включая покрытые электроды, порошковые проволоки и ленты, сварочные флюсы, а также материалы для наплавки. Представлены обзоры состояния производства агломерированных флюсов, материалов для электродуговой сварки, газотермического напыления, наплавки лентами. Приведена справочная информация о производителях сварочных материалов в Украине. Сборник предназначен для научных сотрудников, инженеров и технологов, занимающихся сварочными технологиями и их применением.

*Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала «Автоматическая сварка»*

25–28 мая 2014 г. в Нижнем Новгороде прошла ежегодная Международная конференция «Титан-2014», организованная «Межгосударственной ассоциацией Титан». В конференции приняли участие около 200 человек из России, Украины, Казахстана, Таджикистана, Японии, Германии, Италии, Австрии, Великобритании, Польши и Китая. На конференции выступили с докладами ученые и специалисты в области производства и потребления титана из ведущих научно-исследовательских организаций и промышленных предприятий России, Украины и других стран. Среди них: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», МАТИ–РГТУ им. К. Э. Циолковского, ОАО «ВИЛС», ФГУП «ВИАМ», Уральский федеральный университет им. Б. Н. Ельцина, Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Институт физики высоких давлений РАН, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, ОАО «Корпорация «ВСМПО-АВИСМА», ОАО «Силовые машины», ОАО «Чепецкий механический завод», ОАО «Нормаль», ОАО «Электромеханика», Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Донецкий национальный технический университет, Государственный научно-исследовательский и проектный Институт титана, ГП «Антонов», ALD Vacuum Technologies GmbH (Германия), «Advanced Materials Japan Corporation» (Япония), Seco/Warwick Europe/RETECH (Польша), GFM GmbH (Австрия), TermoSystems GmbH (Германия) и др. Всего было представлено 52 доклада на пленарных заседаниях и в секции стендовых докладов.

Делегация специалистов одного из ведущих мировых центров в области материаловедения титановых сплавов ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» представила на конференции большое количество докладов по созданию новых и совершенствованию существующих титановых сплавов, определению их эксплуатационных характеристик, разработке технологий их сварки, деформационной и термической обработки. Особый интерес вызвал доклад зам. директора В. П. Леонова о перспективах применения титановых сплавов в атомном машиностроении.

Активное участие в работе конференции приняли ученые из двух крупнейших в России материаловедческих центров: ФГУП «ВИАМ» и МАТИ–РГТУ им. К. Э. Циолковского, в которых ведутся интенсивные исследования в области материаловедения титана и сплавов на его основе.

На конференции достаточно полно были представлены научно-технические разработки инсти-

тутов и предприятий Украины в области материаловедения титановых сплавов и производства из них слитков и полуфабрикатов. От ИЭС им. Е. О. Патона были представлены доклады о производстве труб из слитков титановых сплавов, полученных методом электронно-лучевой плавки; свойствах сварных соединений и наплавов из высокопрочных титановых сплавов, полученных аргонодуговой и электронно-лучевой сваркой; структуре и свойствах сплава на основе двухфазного алюминид титана, микролегированного бором и лантаном; использовании нестационарных детонационных процессов для модифицирования поверхности титановых сплавов. Специалисты Донецкого национального технического университета рассказали о своем опыте рафинирования и легирования титана в печи электрошлакового переплава. Представители ООО «Стратегия БМ» (г. Киев) представили линейку электронно-лучевых установок для получения слитков и слябов титана, производимых на их предприятии, а специалисты ООО «Производственное объединение «ОСКАР» (г. Днепропетровск) проинформировали о своих производственных возможностях по изготовлению цельнотянутых труб из титановых сплавов.

В докладах А. В. Александрова (ЗАО «Межгосударственная ассоциация Титан»), Д. А. Курочкина (ОАО «Корпорация «ВСМПО-АВИСМА») и Р. Тургына («Advanced Materials Japan Corporation», Япония) отмечался некоторый рост объемов заказов на титановую продукцию в 2013–2014 гг. в авиастроении на фоне стагнации и даже падения спроса в гражданских отраслях промышленности. Так, мировой объем производства титанового проката в 2013 г. сократился на 24 % по сравнению с 2012 г. и составил 125 тыс. т. Гражданское и военное самолето- и двигателестроение продолжают оставаться основными отраслями потребления титана: использование титановых полуфабрикатов в этих сегментах промышленности в 2013 г. увеличилось на 8 % по сравнению с 2012 г. и составило 64 тыс. т, т. е. более 50 % общего объема производства. Возрастает применение титана на развивающихся рынках медицины, спорта, транспорта, потребительских товаров. Так, ежегодный рост потребления титана при изготовлении имплантов различного назначения составляет 7...10 % и в 2013 г. достиг 4,2 тыс. т. Ситуация на рынке титана в России несколько отличается от общемировых тенденций: при постоянном спросе на титановые полуфабрикаты в авиа- и двигателестроении наблюдается значительный рост использования титана в судостроении, потребление которого в 2013 г. составило 3,2 тыс. т.



После завершения заседаний участники конференции посетили завод ОАО «Нормаль» (г. Нижний Новгород, Россия), который является крупнейшим в СНГ производителем метизов из титановых сплавов. Необходимо отметить интенсивную техническую модернизацию производства, которая проводится на предприятии на фоне

стабильно растущих объемов заказов со стороны авиастроительных заводов России.

В заключение хотелось бы выразить благодарность ее организаторам в лице ЗАО «Межгосударственная ассоциация Титан» и ее председателя А. В. Александрова за высокий уровень проведения конференции.

С. В. Ахонин

## 19-я СЕССИЯ НАУЧНОГО СОВЕТА ПО НОВЫМ МАТЕРИАЛАМ ПРИ КОМИТЕТЕ ПО ЕСТЕСТВЕННЫМ НАУКАМ МЕЖДУНАРОДНОЙ АССОЦИАЦИИ АКАДЕМИЙ НАУК

27–28 мая 2014 г. в Киеве в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины состоялась очередная ежегодная сессия Научного совета по новым материалам при Комитете по естественным наукам Международной ассоциации академий наук (МААН). В заседании приняли участие более 100 ученых и специалистов в области материаловедения от академий наук, вузов и предприятий Беларуси, Казахстана, России и Украины.

27 мая, в первый день работы научного совета, прошли заседания секций «Полимерные материалы» и «Конструкционные и функциональные наноматериалы для медицины». На секциях были заслушаны и обсуждены научные доклады, в которых были представлены результаты исследований, связанных с получением новых полимерных материалов, а также с разработкой наноразмерных частиц, изучением их свойств и созданием на этой базе новых технологий, которые позволяют получать для медицины материалы с уникальными характеристиками.

28 мая состоялось пленарное заседание научного совета, которое открыл его председатель, президент МААН, президент НАН Украины, директор ИЭС им. Е. О. Патона академик Б. Е. Патон. Борис Евгеньевич напомнил, что это уже 19-я сессия Научного совета по новым материалам и в этом году ее программа не имеет узкой направленности, что позволит обсудить в докладах более широкий круг вопросов. Всего на пленарном заседании было представлено 12 докладов.

Чл.-кор. РАН С. С. Иванчев (Санкт-Петербургский филиал Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, РФ) выступил с докладом «Протонопроводящие полимерные мембраны — критерий успеха в создании и внедрении топливных элементов и водородной энергетики». Полимеры представляют собой особый класс материальных объектов, структура которых отлича-

ется многообразием. Особого внимания заслуживают протонопроводящие полимерные материалы, важные для развития водородной энергетики.

В ряде стран (США, Германия, Япония, Франция) технически и технологически обеспечен и организован выпуск компактных источников электроэнергии с полимерными мембранами мощностью от 50 до 500 кВт. Одним из перспективных применений является их объединение в энергоисточники мощностью порядка 1000 кВт для подводных лодок.

Доклад чл.-кора НАН Беларуси Ю. М. Плескачевского (Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого, г. Гомель, Беларусь) «Актуальные проблемы трибоники и вытекающие материаловедческие задачи для смежных наук» был посвящен созданию новых подходов при разработке узлов трения различных машин и механизмов. В докладе предложена новая концепция жизненного цикла узла трения, начиная от разработки технического задания на его проектирование до его утилизации после эксплуатации. Кроме того, автор вводит понятие правильных и неправильных силовых узлов трения. К правильным относятся узлы трения с газостатической и гидродинамической смазкой, электромагнитной подвеской, биологические узлы трения и т. д. Неправильными, по мнению автора, являются узлы с сухим трением, перекошенные узлы трения и узлы трения из однородных материалов.

Доклад «Высокотемпературные защитные покрытия, получаемые электронно-лучевым испарением в вакууме» был подготовлен академиком НАН Украины Б. А. Мовчаном и канд. техн. наук К. Ю. Яковчуком (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев, Украина). Высокотемпературные защитные покрытия по электронно-лучевой технологии, разработанной в институте, наносят на лопатки газотурбинных двигателей и устано-

вок, применяемых в авиации, судостроении, энергетике и газоперекачке. В современных термобарьерных покрытиях внешний керамический слой  $ZrO_2-Y_2O_3$  толщиной 125...250 мкм осаждается на предварительно нанесенный на поверхность пера лопатки металлический жаростойкий слой типа  $Me-Cr-Al-Y$ . В институте разработана технология высокоскоростного электронно-лучевого испарения металлов и сплавов. Применение этой технологии позволяет в 2...3 раза увеличить скорость испарения сплавов  $Me-Cr-Al-Y$ , а также более точно воспроизводить в составе покрытий содержание иттрия в испаряемом сплаве.

Академик НАН Украины *С. А. Фирстов* (ИПМ им. И. Н. Францевича НАН Украины, г. Киев, Украина) представил доклад «Высокоэнтропийные сплавы и новые материалы на их основе». В высокоэнтропийных сплавах нет элемента, который мог бы служить его основой, поэтому нельзя говорить: сплав на основе такого-то элемента. В высокоэнтропийных сплавах возможно особое повышение энергии активации движения всех типов дефектов структуры за счет образования вокруг них специфических атмосфер при небольших релаксационных смещениях атомов различного сорта (размера).

К числу возможных разновидностей высокоэнтропийных сплавов относятся: аморфные сплавы; однофазные твердые растворы; однофазные интерметаллиды и полифазные сплавы. При этом вторые фазы тоже могут быть высокоэнтропийными. При разработке высокоэнтропийных сплавов необходимо учитывать кристаллохимию, различие в атомных размерах входящих в них элементов, электронную концентрацию, энтальпию смещения и некоторые другие факторы.

В докладе чл.-кора НАНУ *И. С. Чекмана* (Национальный медицинский университет им. О. О. Богомольца, г. Киев, Украина) «Нанофармакология: достижения, перспективы» рассмотрено состояние научных исследований и внедрение их результатов в области нанофармакологии. Последняя изучает свойства нанопрепаратов, исследует возможность их применения в медицинской практике для профилактики, диагностики и лечения различных заболеваний с контролем биологической активности, фармакологического и токсикологического действия полученных продуктов или медикаментов.

В Украине в 2008 г. создана общая лаборатория по нанофармакологии ИЭС им. Е. О. Патона и Национального медицинского университета им. О. О. Богомольца. В лаборатории разработана технология получения наночастиц серебра, меди, их композитов, а также наножелеза, наноциркония, наноалюминия и других металлов, наноглерида.

Уже разработаны лекарственные формы (мази, гели, присыпки, капсулы, сиропы, растворы) нанопрепаратов металлов и их композитов с органическими веществами (антибиотики, аскорбиновая кислота, изониазид), которые составляют основу для дальнейшего изучения и внедрения в медицинскую практику. Установлено, что в данных врачебных формах наночастицы серебра, меди и их композитов проявляют более выраженное противомикробное действие, чем эти металлы других размеров. На кафедре фармакологии Национального медицинского университета совместно с Институтом химии поверхности им. А. А. Чуйко НАН Украины разработана оригинальная технология получения композита высокодисперсного кремнезема с наночастицами серебра. Этот биоматериал обладает сорбционными, противомикробными и антиоксидантными свойствами.

Далее на сессии с докладом «Новые подходы идентификации и инактивации опухолюиндуцирующих клеток гибридными комплексами на основе неорганических наночастиц и органических биологически активных соединений» выступил академик НАН Украины *А. Н. Гольцев* (Институт проблем криобиологии и криомедицины НАН Украины, г. Харьков, Украина).

В клинической практике наиболее распространенными методами лечения онкозаболеваний являются иммуно-, химио- и лучевая терапия как в виде самостоятельных подходов, так и в комплексе с хирургическими вмешательствами. Злокачественные новообразования являются следствием экспансии стволовых раковых клеток (СРК), способных к неограниченному самоподдержанию, и составляют менее 5 % общей популяции опухолевых клеток. Идентификация СРК и их инактивация является одной из сверхзадач современной онкологии. Именно такая концепция понимания проблемы легла в основу сформированного в настоящее время направления, получившего название «тераностика».

Д-р хим. наук *З. Р. Ульберг* (Институт биокolloидной химии им. Ф. Д. Овчаренко НАН Украины, г. Киев, Украина) посвятила свой доклад на тему «Наночастицы металлов: безопасность, сертификация, фармацевтический потенциал» применению наночастиц металлов в медицине. В настоящее время разработаны технологии коллоидно-химического синтеза наночастиц различных металлов: серебра (AgNP), меди (CuNP), висмута (BiNP), золота (AuNP), железа (FeNP). Предложены также теоретические модели проникновения наночастиц металлов через плазматическую мембрану клетки и разработаны основы нормативно-методической базы оценки биобезопасности



наноматериалов, что позволило создать банк биобезопасных наночастиц металлов для медицины.

В результате этих работ созданы технологии использования и внедрения в практику фармацевтических препаратов на основе наночастиц металлов. Фармацевтические препараты на основе наночастиц металлов используются для лечения туберкулеза, на основе наночастиц железа создан противоязвенный препарат и, наконец, наноконструкции с использованием наночастиц золота применяются для целевой доставки кардиотропных препаратов. Биобезопасность всех наночастиц проверена на животных. Синтезированные наночастицы железа не цитотоксичны, не генотоксичны, не мутагенны и биобезопасны.

Д-р физ.-мат. наук *Б. Н. Мордюк* (Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, г. Киев) представил на сессии доклад «Наноструктуризация поверхностных слоев ультразвуковой ударной обработкой — как метод повышения эксплуатационных характеристик конструктивных материалов». Исследованиями, проведенными в Институте металлофизики, установлено, что ультразвуковая ударная обработка (УЗУО) позволяет повысить эксплуатационные свойства материалов за счет наноструктуризации поверхностных слоев. В результате интенсивных пластических деформаций при УЗУО обработанный материал приобретает своеобразную слоистую структуру: наноструктурный слой → ультрадисперсный слой → деформированный крупнозернистый слой → недеформированная крупнозернистая матрица.

Ряд параметров ударного нагружения при УЗУО имеет решающее влияние на формирование в тонких поверхностных слоях наноразмерных структур: высокие степень и скорость деформации; наличие многократных разнонаправленных ударных импульсов и сдвиговой компоненты нагружения; деформационный разогрев, который способствует динамическому возврату и динамической рекристаллизации или фазовым превращениям. Установлено, что повышение твердости и износостойкости алюминиевых сплавов А6 и АМг6 в результате УЗУО обусловлено равномерным распределением частиц

квазикристалла в алюминиевой матрице и измельчением зеренной/ячеистой структуры, а также формированием сжимающих напряжений в поверхностном композитном слое толщиной около 60 мкм. УЗУО повышает коррозионную стойкость сплавов Zr–Nb за счет формирования в них ультрадисперсной зеренной структуры (с размером зерна циркониевой матрицы в пределах 100...200 нм), базисной текстуры и пассивных оксидных пленок. Показано также, что УЗУО позволяет создавать наноструктурированные поверхностные слои и сохранять вязкость сердцевин, т. е. получать своего рода бимодальный материал, обладающий повышенным сопротивлением усталости.

Руководитель отдела Института высоких технологий КАЗАТОМПРОМа канд. техн. наук *Н. М. Жандаев* (г. Алма-Ата, Казахстан) рассказал о проводимых в институте работах по электронно-лучевому рафинированию металлургического кремния. Металлургический кремний, произведенный в Казахстане, имеет чистоту 4N. Использование электронно-лучевого переплава позволяет получать кремний с чистотой 6N (99,9999 %), который может использоваться для солнечной энергетики.

В заключение работы сессии выступил академик *Б. Е. Патон*. Он отметил, что на пленарном заседании были заслушаны доклады по большому спектру направлений. Участники сессии получили много полезной информации по водородной энергетике, наноматериалам для медицины и техники. Б. Е. Патон поблагодарил докладчиков и участников сессии за плодотворную работу и пожелал им успехов в дальнейшей работе.

Участники сессии имели возможность в ходе дискуссии обменяться мнениями о докладах, состоянии работ в области разработки новых материалов в своих странах, оценить работу Научного совета по новым материалам, высказать пожелания по ее улучшению. Проводимые ежегодно сессии научного совета позволяют сохранять и развивать творческие связи между учеными различных стран, способствуют интенсификации информационного обмена между ними.

И. А. Рябцев

## МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ»

16–18 июня 2014 г. в Киеве в Институте электросварки им. Е. О. Патона прошла 8-я Международная научно-техническая конференция «Сварочные материалы», организованная ИЭС им. Е. О. Патона, международными ассоциациями «Электрод» и «Сварка», а также Обществом сварщиков Украины (ОСУ) и Российским научно-техническим сварочным обществом (РНТСО). К началу работы конференции были изданы труды в виде специального выпуска журнала «Автоматическая сварка» (№ 6-7 за 2014 г.), где были опубликованы материалы 40 докладов, относящихся к четырем тематическим разделам:

- ♦ процессы дуговой сварки; металлургия, рынки (9 докладов);
- ♦ материалы для механизированных способов сварки (19 докладов);
- ♦ материалы для ручной дуговой сварки (7 докладов);
- ♦ технологии, оборудование и контроль в производстве материалов (5 докладов).

В конференции приняли участие ученые и инженерно-технические специалисты НИИ, вузов, промышленных и коммерческих предприятий, представители ассоциаций из ряда городов Украины (Киев, Запорожье, Николаев, Харьков, Мариуполь, Сумы, Винница, Краматорск), а также из России (Москва), Польши (Гливице), Германии (Альтлайнинген). Всего свыше 80 человек.

В перечень организаций и компаний, чьи специалисты приняли участие в конференции, вошли: ИЭС им. Е. О. Патона, ПАО «ПлазмаТек», «ТМ.Велтек», ООО «Фрунзе-электрод», ОСУ, РНТСО, Николаевский национальный универ-

ситет кораблестроения им. Адмирала Макарова, НТУУ «Харьковский политехнический институт», НТУУ «Киевский политехнический институт», Приазовский ГТУ, ГВП «Экотехнология», «Драхцуг Стеин» (Германия), ЧАО «Запорожстеклофлюс», Институт сварки в Гливицах (Польша), ПАО «Энергомашспецсталь».

На открытии конференции с приветственным словом выступил заместитель директора ИЭС им. Е. О. Патона академик НАН Украины *К. А. Ющенко*. Он передал слова приветствия участникам конференции от имени академика Б. Е. Патона, пожелания успешной и плодотворной работы конференции. *К. А. Ющенко* отметил важность и актуальность тематики конференции, необходимость организации систематических встреч ученых и специалистов по ряду тематических направлений для повышения эффективности развития сварочного производства.

Всего на конференции в течение двух дней были заслушаны в пленарном режиме 32 доклада.

В данном сообщении не ставилась цель подробно осветить содержание выступлений, так как с материалами докладов в полном объеме можно ознакомиться, как уже отмечалось, в № 6-7 журнала «Автоматическая сварка». В целом выступления отражали современный спектр направлений исследований, проводимых в области металлургии и технологии дуговых процессов сварки, наплавки и нанесения защитных покрытий, оценки рынка Украины и мирового рынка сварочных материалов, разработки и применения сварочных материалов (электродов, порошковых и металлических проволок, флюсов, дискретных присадок



Участники конференции «Сварочные материалы»



и порошков) при механизированных процессах и ручной дуговой сварке, наплавке, а также нанесении термических покрытий.

Особый интерес вызвали доклады президента РНТСО проф. *О. И. Стеклова* «Обеспечение целостности сварных конструкций и сооружений при их длительной эксплуатации с применением реновационных технологий», заведующего кафедрой сварки ХПИ, проф. *В. В. Дмитрика* «Особенности деградации металла сварных соединений паропроводов ТЭЦ», заведующего отделом ИЭС им. Е. О. Патона канд. экон. наук *А. А. Мазура* «Рынок сварочных материалов Украины и мировой рынок», проф. Института сварки в Гливицах *Ю. Нагая* «Роль испытаний и сертификации в развитии рынка сварочных материалов в Польше и странах Европейского Союза», ведущего специалиста компании «Драхцуг Стеин» (Германия) *Р. Розерта* «Применение порошковых проволок для сварки в промышленных условиях», а также доклады ученых ИЭС им. Е. О.

Патона *А. Е. Марченко*, *В. Н. Шлепакова*, *В. В. Головки* и др.

Большое впечатление на участников конференции произвел видеофильм, представленный генеральным директором ПАО «ПлазмаТек» *В. П. Слободянюком* на тему «Альтернативное сырье для производства сварочных материалов на современном этапе». Он продемонстрировал новые комплексные подходы в развитии производства покрытых электродов и омедненной проволоки в Украине, позволившие достичь впечатляющих результатов — каждый второй электрод в Украине и третий в Беларуси сегодня произведен на ПАО «ПлазмаТек».

Во время работы конференции состоялись многочисленные двухсторонние переговоры, направленные на кооперацию и укрепление сотрудничества с заинтересованными партнерами, которые были продолжены во время заключительной вечерней прогулки по реке Днепр.

В. Т. Зельниченко  
В. Н. Липодаев

## МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА «Сварка 2014»

24–27 июня 2014 г. в выставочном комплексе «Ленэкспо» состоялась XVI Международная выставка «Сварка/Welding 2014». В этом году она привлекла в два раз больше участников — более 250 компаний из 18 стран. Это подтверждает значимость процессов и технологий сварки для промышленности России и мира.

Посетители и специалисты выставки смогли ознакомиться с новинками ведущих отечественных и зарубежных разработчиков и производителей сварочного оборудования и материалов, среди которых НПФ «Инженерно-технологический сервис», «Уралтермосвар», «Технотрон», «ТКС-Холдинг», Лосино-островский электродный завод, Государственный Рязанский приборный завод, «Крон – СПб», «Эсаб», «Линкольн Электрик», «Пемамек», «Полисуд», «Инвент», «Технологический центр «Техносвар», «Межгосметиз» и др.

Живой интерес у посетителей экспозиции, число которых составило более 3500 человек, вызвали национальные стенды Германии и Китая, крупнейших поставщиков сварочного оборудования и материалов на российский рынок. При содействии Министерства экономических связей и энергетики Германии, Выставочного комитета немецкой экономики AUMA, Союза сварщиков Германии (DVS) и компании Messe Essen GmbH была организована официальная презентация компаний из Германии. В числе участников стенда — производитель оборудо-

вания для контактной сварки — компания Duing, компания DWT, специализирующаяся на оборудовании для подготовки под сварку кромок труб, и компания NB Schutzbekleidung GmbH, представляющая средства защиты сварщика. В свою очередь на стенде КНР, организованном при поддержке Китайского машиностроительного общества, свои изделия и услуги представили 25 предприятий.

В рамках насыщенной деловой программы, сопровождавшей выставку, состоялось 12 мероприятий — конференции, семинары, круглые столы и презентации, в которых приняли участие представители международных отраслевых союзов, специалисты ведущих российских компаний и предприятий, а также научно-исследовательских институтов и высших образовательных учреждений России и зарубежных стран.

Ключевым мероприятием стала Международная конференция «Актуальные проблемы повышения эффективности сварочного производства». Специалисты обсуждали актуальные вопросы развития и модернизации отрасли, а также тенденции, формирующиеся на мировом рынке сварочного оборудования. Как отметил директор Международного общества сварки К. Миддельдорф, выступая в рамках конференции, российский рынок продолжает оставаться в числе пяти крупнейших мировых рынков сварочного оборудования и технологий соединения. По его словам, в 2013 г. общий объем поста-

вок продукции и услуг, относящихся к технологиям сварки и резки, в Российскую Федерацию составил свыше 930 млн дол. США. При этом крупнейшими поставщиками сварочной техники на российский рынок являются германские компании, на долю которых приходится около 20 % общего объема поставок, китайские производители занимают вторую позицию — 18 %.

В свою очередь президент Национального агентства контроля сварки Н. Алешин подчеркнул, что отечественные технологии в области сварки развиваются и соответствуют современному уровню. По его мнению, подтверждение этому можно найти на экспозиции и в «Ленэкспо», 40 % которой составляют российские сварочные технологии и оборудование. При этом прорывной отечественной технологией остается гибридная сварка, которая сегодня применяется на российских судостроительных верфях; он также отметил, что в целом интерес к сварочной отрасли возрастает, об этом свидетельствует увеличение площади выставки на 15% до 3300 м<sup>2</sup>.

Техническая политика в области сварочного производства компании «Газпром» обсуждалась в рамках научно-практической конференции «Современные технологии сварки, оборудование и материалы для строительства и ремонта магистральных трубопроводов». По словам начальника отдела главного сварщика Департамента капитального ремонта компании «Газпром» Е. Вышемирского, ежегодно при проведении ремонтно-строительных работ собственными силами дочерних обществ компании «Газпром» выполняется сварка более 200 тысяч сварных сты-

ков, которые выполняют сварщики, сосредоточенные в 18 газотранспортных и 7 газодобывающих обществах. В целях контроля этой деятельности компания разрабатывает нормативные документы по технологиям сварки и контроля сварных соединений. На сегодня ведется работа по актуализации, сокращению количества и систематизации более 50 таких документов, разработанных в период с 2006 по 2012 гг.

Обсуждая вопрос кадрового резерва отрасли перед конкурсом дипломных проектов выпускников сварочных кафедр петербургских вузов, эксперты отметили, что объединение международного профессионального сообщества сварщиков решит проблему нехватки квалифицированных кадров в области соединительных технологий. Так, директор DVS Р. Беккинг отметил, что нехватка квалифицированных кадров — это не локальная проблема, поэтому союз готов сотрудничать с другими организациями по подготовке специалистов для отрасли.

В Центре деловых контактов в дни выставки состоялось более 80 бизнес-встреч, в том числе с такими крупными компаниями, как «Газпром», «Ленинградский металлический завод», «Заплярпромгражданстрой», «Адмиралтейские верфи», «Производственное объединение «Севмаш», «Электросила» и «Ладожский транспортный завод». Кроме того, в рамках выставки состоялся конкурс «Золотая сварка», по итогам которого 12 участников-победителей получили дипломы и почетные знаки.

По материалам пост-релиза выставки

### От редакции

Опытный завод сварочного оборудования Института электросварки им. Е. О. Патона представил на выставке «Сварка 2014» серию инверторов для ручной дуговой и аргодуговой сварки, аппараты для плазменной резки и универсальный сварочный чоппер для электродуговой сварки изделий из углеродистых и легированных сталей плавящимся электродом с покрытием.



Специалисты ОЗСО демонстрировали работу сварочных аппаратов с использованием различных видов электродов на сварочном стенде, а также предоставляли всем желающим возможность попробовать себя в качестве сварщика. Особый интерес был проявлен к инверторам ВДИ-200Р, которые с января 2014 г. производятся в корпусе с повышенным классом защиты (IP 33) и к установке плазменной резки ПРИ-40S, имеющим встроенный блок защиты от повышенного и пониженного напряжения. Универсальный сварочный чоппер ЧСИ-315М привлек интерес специалистов, которые занимаются вопросами многопостовой сварки. ЧСИ-315М обладает всеми свойствами инверторного источника и в то же



время не зависит от изменений температуры и влажности, а также является более безопасным (не требуется питание 380 В) и бюджетным вариантом по сравнению с инверторными источниками. Применение нескольких ЧСИ-315М, питающихся от одного источника, позволяет исключить влияние сварочных постов друг на друга и проводить сварочные работы вне зависимости от колебания напряжения в сети и длины сварочных кабелей.

Позитивно был воспринят тот факт, что с марта 2014 г. установлена 5-летняя гарантия на сварочные инверторы серий АДИ и ВДИ. Наличие европейских сертификатов на сварочные инверторы и собственные линии по производству электродов для сварки углеродных и низколегированных сталей (АНО-4, АНО-21, АНО-36 и УОНИ-13/55) также были отмечены посетителями стенда как фактор успешного развития марки ПАТОН. Кроме специализированных брошюр и каталогов по сварочному оборудованию марки ПАТОН, посетители стенда ОЗСО имели возможность получить майский выпуск журнала «Автоматическая сварка», который пользуется заслуженной популярностью среди профессионалов сварочного производства. Практические аспекты использования различных сварочных аппаратов, предельные возможности оборудования, условия сервисного обслуживания и поддержки, а также развитие перспективных направлений сварки — были главными темами дискуссий на стенде ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона.

## СЕМИНАР «АВТОМАТИЗАЦИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ»

*С 1950 г. австрийская компания «Fronius» разрабатывает комплексные решения для электродуговой и контактной точечной сварки. Инновационные сварочные системы компании и их компоненты характеризуются совершенным взаимодействием всех своих структурных элементов и гарантируют отличное качество продукции, рентабельность и энергоэффективность. Среди широкого ряда высокотехнологичного оборудования «Fronius» особое место занимают сварочные системы, созданные для автоматизации и роботизации процессов дуговой сварки.*

25 июня 2014 г. в с. Княжичи Броварского р-на Киевской области ООО «Фрониус Украина» провела технический семинар на тему «Автоматизация сварочных процессов». В работе семинара приняли участие свыше 30 специалистов и руководителей сварочных работ ряда предприятий Украины.

В кратком вступлении заместитель директора ООО «Фрониус Украина» В. Л. Бондаренко отметил, что по статистике в мире в 2011 г. применялось около 50 тысяч роботов, из них в сварочном производстве около 20 тысяч. Примерно 70 % роботов используется в странах Азии, около 12 % — в Америке и 15 % — в Европе. Причем в том же 2011 г. практически каждый третий сварочный робот укомплектовывался источником питания от компании «Fronius». Это свидетельствует о признании продукции компании в мире, практически ежегодно предлагающей на рынке новации. Одна из них стабилизация проплавления — это новая функция, реализованная в источниках питания «Fronius» путем изменения скорости подачи электродной проволоки в процессе сварки. В условиях

механизированных процессов сварки МИГ/МАГ при изменении вылета электрода от 10 до 30 мм поддерживается постоянное проплавление. Эта же функция поддерживается как при автоматической сварке, так и при ручной дуговой (при колебаниях длины дуги от 2 до 40 мм).

Далее В. Л. Бондаренко отметил, что по состоянию на 2012 г. наибольшее количество сварочных роботов используется в Китае (~6000), далее в США, потом (по степени убывания) в Японии, Германии, Индии, Корее, Тайване, Польше и др. В Украине есть лишь отдельные случаи применения сварочных роботов.

«Автоматизация. Инновация—Качество—Производительность» — эта тема презентации менеджера компании В. Онищука. С помощью видеобзора он продемонстрировал возможности различных современных систем компании «Fronius», применяемых для автоматизации дуговых процессов сварки и наплавки.

Среди них:

- ♦ аргонодуговая наплавка ТИГ с присадкой (однодуговая наплавка поверхностей, двухдуговая наплавка внутренних поверхностей труб с увеличенной производительностью сварки);

- ♦ сварочные тележки (в сочетании с различными рельсами автоматизируется процесс выполнения продольных и кольцевых швов);

- ♦ процесс СМТ (холодный перенос металла, реализуемый как в среде аргона, так и углекислого газа);

- ♦ усовершенствованные приспособления для обварки труб в трубных досках;

- ♦ системы для выполнения прямолинейных швов (на медной подкладке с зажимами);



- ◆ система с видеонаблюдением за процессом сварки и записью параметров сварки;
- ◆ система с лазерным датчиком для слежения за стыком при выполнении продольных швов;
- ◆ система для плазменной сварки труб корабельных систем;
- ◆ система для сварки автомобильных баков (двумя горелками одновременно);
- ◆ износостойкая восстановительная наплавка подшипников с применением СМТ процесса;
- ◆ наплавка внутренних поверхностей труб (минимальный диаметр 25 мм).

Эти и ряд других систем обеспечивают высокую производительность, облегчают труд сварщика. Последнему отводится роль по сути оператора сварочного процесса. Системы нашли применение во многих секторах промышленности. ООО «Фрониус Украина» при работе с заказчиком осуществляет комплексный подход. Начиная от моделирования процесса применительно к конкретной задаче, затем сервисной поддержки во внедрении и последующим сервисным обслуживанием.

Накоплен определенный опыт применения автоматизированных систем Fronius для сварки в Украине. ОАО «Турбоатом» применяет их при сварке труб из титановых сплавов, ИЦ «Энергомаш» (г. Харьков) использует систему, снабженную головкой с колебанием. Автоматизированные системы находят применение в фармацевтике, при восстановлении горно-шахтного оборудования (СМТ наплавка с применением короткой горелки), при наплавке подшипников большого диаметра, аргонодуговой наплавке запорной арматуры, ТИГ сварке кольцевых соединений с подачей двух присадочных проволок или с помощью сменной головки (дуговой или плазменный процесс), выполнении продольных швов балок (одновременно двумя горелками с датчиком слежения при скорости сварки до 30 м/ч), сварке самолетных баков топлива.

Fronius постоянно обновляет ассортимент своей продукции. Среди последних разработок

*Комплексная наплавочная ячейка.* Она занимает площадь в 4,5 м<sup>2</sup>, снабжена компьютерным управлением за процессом наплавки. Предлагаются *магнитные сварочные тележки* для механизации процессов сварки при выполнении стыковых и угловых соединений в различных пространственных положениях. Создана *мультисистема* для выполнения продольных и кольцевых проходов при наплавке, *магнитный центратор* для орбитальной обварки труб, *сварочные тележки на гибких направляющих* для выполнения кольцевых, прямолинейных швов и швов сложной геометрии.

Вся сварочная продукция Fronius обязательно сертифицируется с тем, чтобы отвечать мировым требованиям.

Далее на семинаре были заслушаны презентации на темы: «Автоматизация/Сварочные тележки» (А. Пиндюра), «Орбитальные системы сварки» (Р. Кулиш), «Новые продукты от Fronius» (В. Слюта), «Наплавка методом СМТ и СМТ TWIN» (В. Нечипоренко), «Системы Fronius для роботизированной сварки» (К. Корзин), «Новые продукты Fronius для МИГ/МАГ сварки» (В. Слюта).

Ниже коротко о наиболее заслуживающем внимания читателей.

Сварочные тележки выпускаются двух типов: на магнитной основе и с дополнительными приспособлениями (несут на себе подающий механизм, перемещение до 25 м). Направляющие могут комплектоваться в зависимости от длины пути перемещения и характера траектории (прямолинейно, по кольцу, по сложной траектории). Обеспечивают плавное и точное перемещение сварочной головки. Снабжены колебателями (в том числе управляемыми дистанционно). Управление процессом на тележке согласовано с инверторным источником. Возможно удержание тележки на изделиях с помощью магнитов или вакуумными киосками.

Для орбитальной сварки выпускаются устанавливаемые на тележке системы *FRA 2020* и

*FRA 2030*, значительно более экономичны, чем от Polysoude. Установка системы — 1,5 ч. Возможна легкая установка любой горелки, предназначенных для ручной или механизированной сварки. Система управляется или непосредственно на сварочной головке или на источнике. Возможна сварка без присадки или присадкой. В системе FTW24-1120PRO для орбитальной сварки «труба–трубная доска» реализованы такие новации, как пневматический зажим для фиксации трубы, водоохлаждаемая горелка, регулятор настройки, подвесное устройство и блок управления. Сварка осуществляется в горизонтальном или вертикальном положениях. Оборудована система тремя центраторами для сварки труб диаметром от 30 до 120 мм.



Среди продуктов Fronius, которые могут появиться на рынке в IV кв. 2014 г. и I-II кв. 2015 г., можно отметить систему *SPEED-CLAD*, относящуюся к ТИГ-наплавке. В ней новая горелка (подача одной или двух присадочных проволок одновременно). Назначение: наплавка коррозионностойких или износостойких внутренних или наружных поверхностей труб, запорной арматуры. Fronius исходил из того, что в общем цикле производства изделия сварка занимает  $\approx 60\%$  времени. Сокращение его возможно путем увеличения производительности сварки. При присадке двух предварительно подогреваемых проволок обеспечивается более концентрированная и лучше управляемая дуга, возможность контроля проплавлением и процессом наплавки. Ширина наплавленного валика обеспечивается как при МИГ/МАГ сварке. Достигается увеличение производительности (4,3 кг/ч) в три раза большая по сравнению с обычной сваркой ТИГ, или увеличению скорости сварки в четыре раза, значительное снижение проплавления способности.

Еще одной интересной новацией следует признать применение процессов «СМТ и СМТ TWIN» для наплавки. Известно, что для МИГ/МАГ процессов в качестве недостатка можно отметить излишнее для ряда случаев проплавление основы. При СМТ процессе цифровая система источника реагирует на момент короткого замыкания, механизм подачи изменяет направление переме-

щения проволоки и капля металла без возмущений отделяется в ванну. При этом проплавление уменьшается (доля участия основного металла в наплавленном ограничено 15 %) при производительности наплавки  $\sim 4,3$  кг/ч. Сочетание «СМТ и СМТ TWIN» позволяет еще более понизить проплавление (долю основного металла до 6 %). В этом случае сварка осуществляется двумя дугами, повышается производительность сварки, появляется возможность ведения отдельно СМТ процесса или импульсного.

Вскоре Fronius представит на рынке новый мощный источник питания *TPS 600* для МИГ/МАГ сварки на 600 А (обеспечивает так называемую ротационную дугу. При этом достигается увеличение производительности в 2 раза. За три смены можно наплавить 312 кг металла. Он будет укомплектован специальным механизмом подачи (до 30 м/мин) и моторредуктором. Для сварки будут применяться горелки МТW на 700 А (с двухконтурной системой охлаждения).

Участники семинара с большим вниманием заслушали презентации, которые вызвали большое количество вопросов. Затем в практической части семинара менеджеры ООО «Фрониус Украина» продемонстрировали показ и демонстрацию дугового оборудования и приспособленный Fronius, предназначенных для механизации и автоматизации сварочных работ.

В. Н. Липодаев



В июне известному специалисту в области сварки в твердой фазе доктору технических наук, профессору, ведущему научному сотруднику ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, лауреату Ленинской премии Геннадію Константиновичу Харченко исполнилось 80 лет.

Свою трудовую деятельность после окончания Киевского политехнического института в 1957 г. он начал на Киевском машиностроительном заводе, где занимал должности техника-конструктора и инженера-конструктора. С 1959 г. научная и трудовая деятельность Г. К. Харченко неразрывно связана с ИЭС им. Е. О. Патона. За время работы в институте он прошел путь от инженера до ведущего научного сотрудника.

За более чем полувековой период работы в ИЭС им. Е. О. Патона юбилар внес весомый вклад в развитие теории и практики процессов сварки плавлением и давлением. Им выполнен ряд исследований по электронно-лучевой сварке хрома, циркония, молибдена, ниобиевых и титановых сплавов, монокристаллов тугоплавких металлов, а также разнородных металлов. Широкую известность получил цикл его работ по контактной стыковой сварке малоуглеродистых низколегированных трубных сталей.

Важным аспектом научной деятельности Г. К. Харченко является разработка научных основ образования соединения при диффузионной сварке в вакууме, которой он посвятил последние пять-

десять лет. При его непосредственном участии были выполнены работы по соединению дисперсно-упрочненных композиционных материалов на алюминиевой основе, алюминидов титана, химически активных и тугоплавких металлов со сталью, хрома с медью и других пар металлов.

Г. К. Харченко предложен новый способ сварки давлением металлов в вакууме с нагревом с приложением высокоинтенсивного силового воздействия — ударная сварка в вакууме. При этом наблюдается аномальный массоперенос атомов, заключающийся в том, что в условиях высокоскоростной пластической деформации при повышенной температуре резко возрастает скорость миграции атомов в кристаллической решетке металлов и сплавов. За разработку и широкое внедрение в производство диффузионной сварки металлических и неметаллических материалов в 1984 г. Г. К. Харченко в коллективе соавторов удостоен Ленинской премии.

Г. К. Харченко является автором более 270 научных работ и изобретений, им подготовлено 17 кандидатов и три доктора технических наук.

С 2002 г. Г. К. Харченко успешно совмещает научную работу с педагогической, являясь заведующим кафедры технологий сварки и строительства Черниговского национального технологического университета. Плодотворная научно-педагогическая деятельность Г. К. Харченко отмечена в 2009 г. наградой Президиума НАН Украины «За подготовку научной смены».

Внимательное и чуткое отношение к сотрудникам, большая работоспособность, тонкое понимание задач, глубокое проникновение в суть исследуемых процессов снискали Геннадію Константиновичу заслуженный авторитет и уважение среди специалистов-сварщиков.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины

**Контакты:**

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

Подписано к печати 15.07.2014. Формат 60×84/8. Офсетная печать.  
Усл. печ. л. 17,09. Усл.-отт. 18,2. Уч.-изд. л. 20,00 + 2 цв. вклейки.  
Печать ООО «Фирма «Эссе».  
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.