



## 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,  
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 Самарии, Ариэль, Израиль  
В. И. Лысак  
Волгоградский гос. техн. ун-т, РФ  
У. Райсен  
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

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

- Интервью с Генеральным директором ОАО «Турбоатом»  
В.Г. Субботиным ..... 3
- Кучук-Яценко С. И., Швец Ю.В., Швец В.И.* Влияние  
неметаллических включений в трубных сталях класса  
прочности Х65–Х80 на показатели ударной вязкости сварных  
соединений, выполненных контактной стыковой сваркой  
оплавлением ..... 5
- Осин В.В.* Триботехнические свойства наплавленного  
металла типа 50Х9С3Г с повышенным содержанием  
серы ..... 11
- Демиденко Л.Ю., Онаяцкая Н.А., Половинка В.Д.* Влияние  
температуры термомеханической обработки на качество  
соединений разнородных металлов ..... 14
- Борисов Ю.С., Войнарович С.Г., Кислица А.Н., Калюжный  
С.Н.* Исследование пятна напыления и фигуры металли-  
зации в условиях микроплазменного нанесения покрытия  
из диоксида титана ..... 19
- Коржик В.Н., Борисова А.Л., Попов В.В., Коломыцев М.В.,  
Чайка А.А., Ткачук В.И., Вигилянская Н.В.* Керметные покры-  
тия системы «карбид хрома–нихром», полученные методом  
сверхзвукового воздушно-газового плазменного напыления ... 23

## ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

- Зяхор И. В., Завертанный М.С., Чернобай С.В.* Линейная  
сварка трением металлических материалов (Обзор) ..... 29
- Чертко П.Н., Семенов Л.А., Гуцин К.В.* Контактная  
стыковая сварка оплавлением тонкостенных профилей  
из термически упрочняемых алюминиевых сплавов ..... 37
- Жудра А.П., Кривчиков С.Ю., Дзыкович В.И.* Использование  
комплексно-легированных порошков, полученных методом  
термоцентробежного распыления, в порошковых  
проводах ..... 41
- Переплетчиков Е.Ф., Рябцев И.А., Ланкин Ю.Н., Семикин  
В.Ф., Осечков П.П.* Модернизация системы управления  
процессом плазменно-порошковой наплавки установки  
А1756 ..... 46
- Программа профессиональной подготовки на 2015 г. .... 50

## ХРОНИКА

- 56-я Международная конференция «Сварка — всегда может  
больше» ..... 54

## Информация

- Указатель статей за 2014 г. .... 57
- Указатель авторов ..... 63

## 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,  
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

## SCIENTIFIC AND TECHNICAL

- Interview with V.G. Subbotin, the General Director of OJSC  
«Turboatom» ..... 3
- Kuchuk-Yatsenko S.I., Shvets Yu.V., Shvets V.I.* Effect of  
non-metallic inclusions in pipe steels of X65-X80 class of strength  
on values of impact toughness of welded joints made by  
flash-butt welding ..... 5
- Osin V.V.* Tribotechnical properties of deposited metal of  
50Kh9S3G type with increased sulphur content ..... 11
- Demidenko L.Yu., Onatskaya N.A., Polovinka V.D.* Effect of  
temperature of thermomechanical treatment on quality of  
dissimilar metal joints ..... 14
- Borisov Yu.S., Voinarovich S.G., Kislitsa A.N., Kalyuzhnyi S.N.*  
Investigation of spraying spot and pattern of metallization  
under conditions of microplasma spraying of titanium dioxide  
coating ..... 19
- Korzhik V.N., Borisova A.L., Popov V.V., Kolomytsev M.V.,  
Chaika A.A., Tkachuk V.I., Vigilyanskaya N.V.* Cermet coatings  
of «chromium carbide-nichrome», produced by the method of  
supersonic air-gas plasma spraying ..... 23

## INDUSTRIAL

- Zyakhor I.V., Zavertannyi M.S., Chernobay S.V.* Linear friction  
welding of metallic materials (Review) ..... 29
- Chvertko P.N., Semyonov L.A., Gushchin K.V.* Flash-butt welding  
of thin-walled profiles of heat-treated aluminium alloys ..... 37
- Zhudra A.P., Krivchikov S.Yu., Dzykovich V.I.* Application of  
complexly-alloyed powders, produced by the method of thermo-  
centrifugal spraying, in flux-cored wires ..... 41
- Pereplyotchikov E.F., Ryabtsev I.A., Lankin Yu.N., Semikin V.F.,  
Osechkov P.P.* Modernization of installation A1756 system for  
control of plasma-powder surfacing process ..... 46
- Program of professional training for 2015 ..... 50

## NEWS

- The 56<sup>th</sup> International Conference «Welding — can be more» ..... 54

## INFORMATION

- Index of articles for 2014 ..... 57
- Index of authors ..... 63

«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».

## ИНТЕРВЬЮ С ГЕНЕРАЛЬНЫМ ДИРЕКТОРОМ ОАО «ТУРБОАТОМ» В. Г. СУББОТИНЫМ



В. Г. Субботин, генеральный директор ОАО «Турбоатом»

**Вопрос:** Виктор Георгиевич, Вы один из самых успешных генеральных директоров Украины и руководите предприятием ОАО «Турбоатом» — крупнейшим мировым производителем энергетического оборудования. Под Вашим руководством на протяжении ряда лет «Турбоатом» существенно наращивает темпы производственно-экономического развития. За весомый вклад в экономику Украины деятельность ОАО «Турбоатом» получила высокую оценку Президента Украины П. А. Порошенко. Виктор Георгиевич, приведите основные экономические показатели работы ОАО «Турбоатом».

**Ответ:** ОАО «Турбоатом» в условиях жесткой конкуренции с крупнейшими зарубежными производителями энергетического оборудования, например, с европейскими фирмами «Siemens» и «Alstom», стабильно наращивает темпы своего развития. Доход от реализации продукции за первое полугодие 2014 г. составил 1 103 млрд грн. с темпом роста 132 % к аналогичному периоду прошлого года. Сумма налогов, перечисленных в государственный и местный бюджеты, составила 434 млн грн. Мы и дальше будем делать все возможное для наращивания темпов экономического роста ОАО «Турбоатом».

**Вопрос:** На ОАО «Турбоатом» отмечается устойчивая тенденция повышения среднемесячной заработной платы своим сотрудникам. Какая сегодня месячная заработная плата промышленно-производственного персонала?

**Ответ:** Рост заработной платы сотрудников определяется нашей производственной деятельностью и зависит от объемов реализуемой продукции. Рост заработной платы за первое полугодие составил 114 %. Среднемесячная заработная плата промышленно-производственного персонала составляет 4742 грн., это самая высокая заработная плата среди предприятий машиностроительного профиля Украины. Средний возраст сотрудников ОАО «Турбоатом» составляет 43 года. Предприятие работает в двух-трехсменном режиме.

**Вопрос:** Какое оборудование было изготовлено и поставлено на атомные, тепловые и гидравлические станции за первое полугодие этого года?

**Ответ:** В апреле этого года при участии специалистов ОАО «Турбоатом» начался монтаж и пусконаладочные работы на блоке № 2 Трипольской ТЭС, а 16 мая был подписан акт о предварительном вводе энергоблока в эксплуатацию. Затем на блоке будет продолжаться набор мощности до номинальной 325 МВт. На блоке № 2 Трипольской ТЭС «Турбоатом» выполнил модернизацию паровой турбины К-300-240-2 с заменой ее на агрегат К-325-23,5, что существенно повысило эффективность работы ТЭС и дало экономию топлива.

На блоке № 8 Добротворской ТЭС «Турбоатом» выполнил модернизацию паровой турбины К-160-130 с реконструкцией проточной части цилиндров высокого и среднего давления, системы регулирования с установкой цилиндра низкого давления. Модернизация обеспечила повышение мощности турбоагрегата до 160 МВт и увеличение КПД до 85,5 %. Повысилась надежность и экономичность турбины, а также улучшились экономические показатели энергоблока.





*В мае этого года специалисты ОАО «Турбоатом» завершили уникальную работу по замене шарового гидрозатвора на крупнейшей в Средней Азии Нурекской ГЭС, в Таджикистане.*

*На Каневской ГЭС реализуется проект модернизации горизонтально-капсульной гидротурбины с установкой нового колеса и направляющего аппарата. После реконструкции мощность гидрооборудования возрастет с 19,2 до 23 МВт, КПД повысится на 4 %, а также увеличится надежность и долговечность турбины. Перечень выполняемых работ можно продолжить.*

**Вопрос:** Известно, что для изготовления продукции энергетического машиностроения необходимо использовать самое современное оборудование и, соответственно, самые современные технологии. Как на «Турбоатоме» происходит модернизация паркового оборудования, а также внедряются новые технологии?

**Ответ:** *На техническое перевооружение и капитальный ремонт оборудования за период 2013 г. — первое полугодие этого года наше предприятие инвестировало 114 млн грн. Например, в апреле этого года мы приобрели у чешской компании «Тех Тех» термическую печь с выкатным подом и в мае ввели в эксплуатацию. Печь является более экономичной по потреблению газа, чем известные аналогичные печи. Эксплуатация печи обеспечила улучшение качественных характеристик выпускаемой продукции. Повысилась культура металлургического производства, а также улучшились экологические показатели термического участка. Завершающим этапом реконструкции литейного и металлургического производств является запланированная на 2014–2015 гг. модернизация двух сталеплавильных печей. Сейчас осуществляется модернизация трех крупных центров, предназначенных для механической обработки крупногабаритных деталей. Работы на них выполняют специалисты компаний «Waldrich Coburg» (Германия) и Skoda (Чехия) совместно с нашими специалистами.*

**Вопрос:** Какие новейшие сварочные технологии, способные конкурировать с зарубежными, находят применение на «Турбоатоме» при изготовлении энергетического оборудования?

**Ответ:** *В апреле этого года в сборочно-испытательном цехе была модернизирована порталная установка для многопроходной автоматической дуговой сварки под флюсом кольцевых швов роторов паровых турбин — миллионников мощностью 1000 МВт и более. Также на установке выполняется сварка валов, наплавка корпусов рабочих колес и поверхностей на валах гидротурбин. Недавно была внедрена самая современная установка электронно-лучевой сварки для пакета рабочих лопаток турбин и впервые разработана соответствующая технология их изготовления. Технология разработана совместно с ИЭС им. Е. О. Патона, с которым у нас сложились хорошие научные и производственные отношения. Внедрение нового сварочного оборудования и новых сварочных технологий на «Турбоатоме» производится с учетом результатов НИР, проводимых совместно с ИЭС им. Е. О. Патона и НТУ «ХПИ».*

**Вопрос:** Виктор Георгиевич, какая перспектива технико-экономического развития «Турбоатома» в условиях усиливающейся конкуренции на мировом рынке производителей энергетического оборудования?

**Ответ:** *Сегодня предприятие с уверенностью смотрит в будущее, ведь для этого у нас есть все основания — мощная производственная и научно-техническая базы, надежный портфель заказов, а главное — высококвалифицированные работники и молодежь, которая готова учиться и продолжать славные традиции предприятия.*

Беседу записал д-р техн. наук В. В. Дмитрик



УДК 621.791.762.1

# ВЛИЯНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ТРУБНЫХ СТАЛЯХ КЛАССА ПРОЧНОСТИ Х65–Х80 НА ПОКАЗАТЕЛИ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКОЙ ОПЛАВЛЕНИЕМ

С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, Ю. В. ШВЕЦ, В. И. ШВЕЦ

ИЭС им. Е.О.Патона НАНУ. 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведены всесторонние механические испытания соединений труб из высокопрочных сталей, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением. Качество соединений полностью удовлетворяет требованиям международного стандарта API STANDART 1104. При испытаниях на ударный изгиб наблюдались отдельные выпадки показателей  $KCV_{-40}$  ниже уровня, требуемого стандартами DNV-OS-F101 и СТО Газпром 2-3.7-380–2009. Снижение показателей  $KCV_{-40}$  обусловлено формированием в плоскости соединения участков площадью 1...2 мм<sup>2</sup>, отличающихся структурной неоднородностью, которая характерна и для основного металла и проявляется в резко выраженной анизотропии его пластических свойств. Показано, что участки со структурной неоднородностью не образуют колоний, поэтому они не снижают общую работоспособность сварного соединения. Размеры этих участков не превышают допустимых значений, принятых стандартами для дефектов дуговых швов. Наличие отдельных точечных выпадов показателей  $KCV_{-40}$  при испытаниях сварных соединений, выполненных КССО, не следует считать браковочным признаком. Библиогр. 8, табл. 1, рис. 11.

*Ключевые слова:* контактная стыковая сварка оплавлением, высокопрочная сталь, ударная вязкость сварных соединений, термическая обработка сварных швов

Многолетние работы ИЭС им. Е. О. Патона по контактной стыковой сварке труб больших диаметров [1] в последние годы получили дальнейшее развитие. Разработана технология контактной стыковой сварки оплавлением (КССО) толстостенных труб диаметром 1219...1420 мм из высокопрочных сталей, используемых при сооружении современных трубопроводов большой производительности. Технология сварки и термической обработки обеспечивает получение соединений с высокими показателями механических свойств, которые соответствуют требованиям международных стандартов [2–4]. На основе этой технологии ЗАО «Псковэлектросвар» (РФ) при участии ИЭС им. Е.О. Патона разработало новое поколение оборудования для КССО труб диаметром 1219...1420 мм. В настоящее время проводятся всесторонние испытания этого оборудования и технологии сварки, а также ее адаптация к нормативным требованиям, предъявляемым к качеству сварных соединений труб при строительстве морских и наземных трубопроводов, в том числе в условиях Крайнего Севера.

Для таких трубопроводов международными стандартами [3, 4] установлены нормативные показатели ударной вязкости сварных соединений кольцевых швов не менее 37,5 Дж/см<sup>2</sup> при тем-

пературе испытаний, которая должна быть на 20 °С ниже проектной температуры эксплуатации трубопровода.

Целью настоящей статьи является определение факторов, которые влияют на значение и стабильность показателей ударной вязкости соединений труб из высокопрочных сталей, выполненных КССО.

Разработку технологии сварки проводили на секторах труб диаметром 1219 мм с толщиной стенки 27 мм, которые изготовлены из листовой стали 10Г2ФБ класса прочности Х70, полученной контролируемой прокаткой с термомеханическим упрочнением, следующего химического состава, мас. %: 0,06 С; 0,21 Si; 1,42 Mn; 0,12 Ni; 0,07 Mo; 0,04 V; 0,04 Al; 0,02 Ti; 0,05 Cr; 0,02Nb; 0,004 S; 0,012 P. Механические свойства основного металла, а также сварных соединений после термической обработки приведены в таблице. Режимы сварки и термической обработки представлены в работах [5, 6]. Все сварные соединения подвергали неразрушающему контролю (радиографическому, ультразвуковому) с высокой разрешающей способностью.

Механические испытания сварных стыков проводили в лаборатории ИЭС им. Е.О. Патона согласно требованиям, изложенным в работе [3]. Данная лаборатория сертифицирована в соответствии с международными стандартами. Ме-



Механические свойства металла труб и сварных соединений

Участок исследования	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup> , при температуре, °С			
			+20	-20	-30	-40
Основной металл	$\frac{484,4...493,5}{490,0}$	$\frac{546,7...556,8}{553,0}$	$\frac{334,7...336,6}{335,8}$	–	–	$\frac{333,0...336,6}{334,9}$
Сварное соединение после термической обработки	–	$\frac{550,6...561,4}{554,6}$	$\frac{147,9...219,5}{173,2}$	$\frac{86,8...171,1}{137,9}$	$\frac{84,5...167,5}{115,5}$	$\frac{19,1...129,1}{98,6}$

таллографические исследования проводили на световом микроскопе «Неофот-32», анализы поверхности изломов и микроструктуры соединений — на Оже-микронде JAMP 9500F фирмы «JEOL» (Япония) в лаборатории металлографических исследований.

В образцах, испытанных на статический изгиб после термической обработки и представленных на рис. 1, разрушений и трещин не обнаружено.

Как видно из таблицы и рис. 1, 2, у термообработанных сварных соединений показатели ударной вязкости удовлетворяют требованиям в температурном диапазоне +20...–30 °С [3, 4], предъявляемым к морским трубопроводам. С понижением температуры испытаний  $T_{исп}$  образцов на ударный изгиб показатели KCV снижаются, а разброс их значений возрастает (рис. 2). Тем не менее при  $T_{исп} = -30$  °С они остаются на достаточно высоком уровне 84,5...167,5 Дж/см<sup>2</sup>, а при  $T_{исп} = -40$  °С, которая предусмотрена для континентальных трубопроводов в условиях Крайнего Севера, разброс показателей возрастает и наблюдаются отдельные выпадения ниже уровня 37,5 Дж/см<sup>2</sup>, регламентированного стандартом DNV-

OS-F101. Количество таких образцов, испытанных при указанной температуре, не превышает 10...15 %. При этом средний показатель KCV остается достаточно высоким — 98,6 Дж/см<sup>2</sup>.

Контроль сварных соединений всех образцов неразрушающими методами не обнаружил каких-либо несовершенств структуры металла по плоскости соединения, которые можно было бы классифицировать как дефектные, даже при настройке приборов на повышенную чувствительность.

Макро- и микроструктура соединения труб, выполненного на оптимальном режиме с последующей термообработкой, приведены на рис. 3. Общая ширина зоны термического влияния (ЗТВ) после сварки и термообработки составляет около 60 мм. Основу микроструктуры металла ЗТВ так же, как и основного металла, составляет феррит. По линии соединения микроструктура отличается несколько большим по сравнению с микроструктурой ЗТВ размером ферритного зерна (10...15 мкм) и наличием частично распавшегося

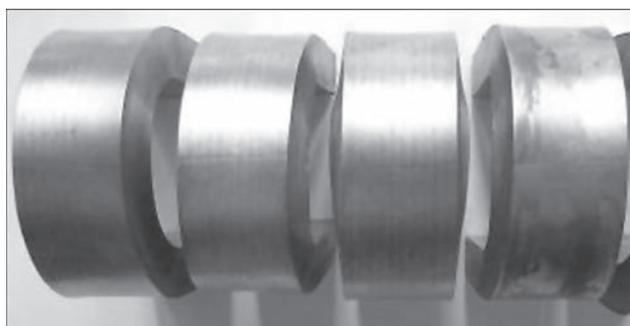


Рис. 1. Образцы сварного соединения, испытанные на статический изгиб после термообработки

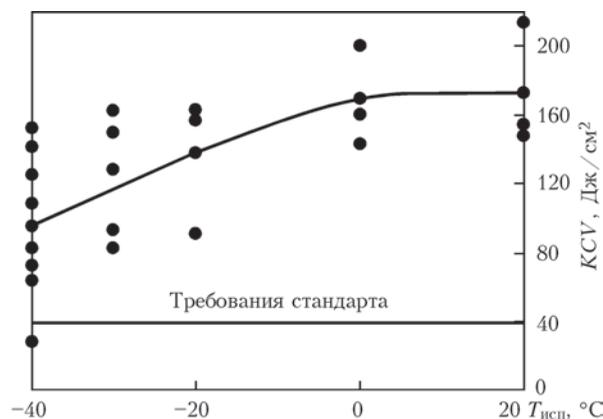


Рис. 2. Температурная зависимость ударной вязкости сварных соединений

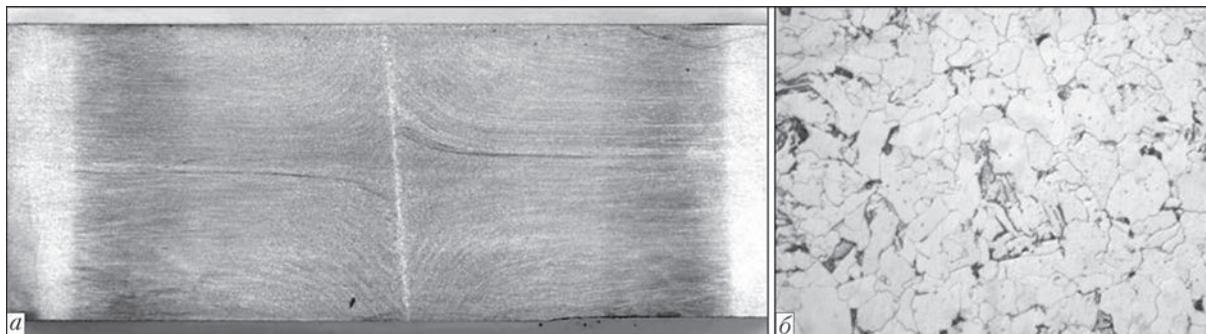


Рис. 3. Макро- (а) и микроструктура (б, ×1000) соединения трубной стали на участке линии соединения

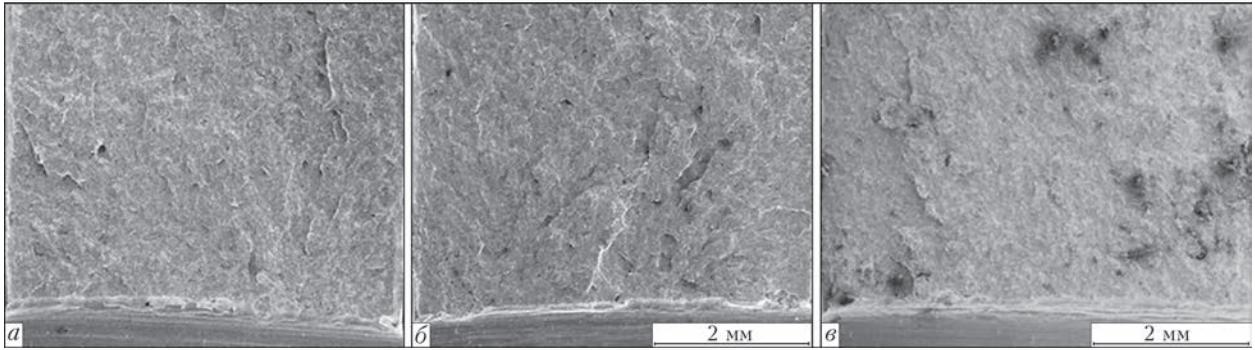


Рис. 4. Макроструктура изломов сварных образцов после испытаний на ударный изгиб: а —  $KCV_{-40} = 110$  Дж/см<sup>2</sup>; б — 29,1; в — 19,1

с образованием зернистого бейнита остаточного аустенита.

В ходе сравнения микроструктуры шва образцов, которые при испытаниях показали минимальные и максимальные значения  $KCV_{-40}$ , не выявлено каких-либо отличий.

Проведен анализ структуры изломов сварных образцов после испытаний на ударный изгиб. Исследования показали, что изломы образцов во всех случаях кристаллические (рис. 4). Развитый рельеф в некоторых случаях связан с наличием в металле крупных неметаллических включений.

Микроструктура поверхности изломов всех образцов морфологически едина (рис. 5). Фасетки скола с типичными для разрушения сколом элементами структуры такими, как ступеньки ручьистого узора и язычки, сочетаются с гребнями отрыва – элементами вязкого разрушения. Характерно наличие вторичных трещин по межфазным границам.

Ударная вязкость образцов с такой микроструктурой при практически отсутствующих неметаллических включениях соответствовала нормативным требованиям (рис. 4, а).

У образцов с низкой ударной вязкостью отмечалось наличие на поверхности излома скоплений неметаллических включений (рис. 4, в). Микро-

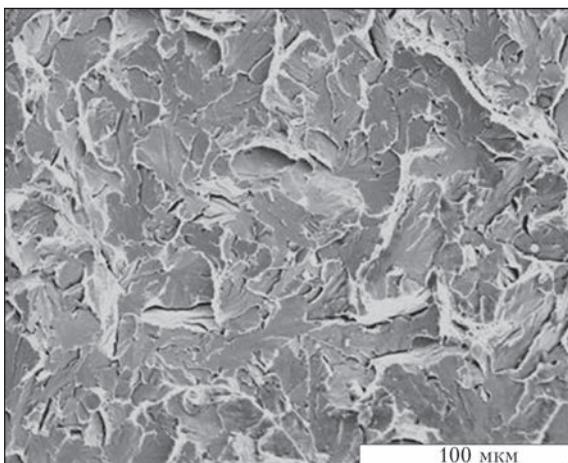
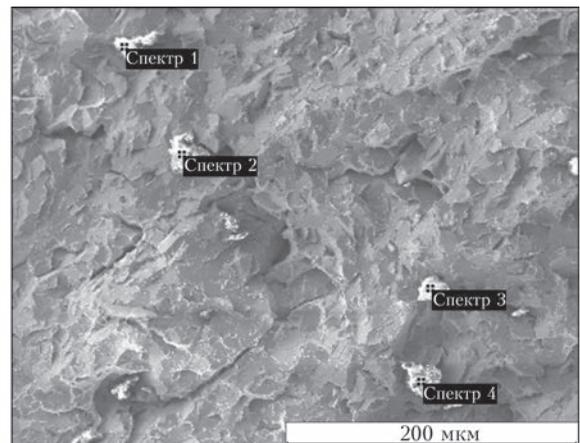


Рис. 5. Микроструктура поверхности излома после испытаний на ударный изгиб

рентгеноспектральный анализ химического состава позволил выделить следующие типы. Это комплексные оксиды кремния, кальция, алюминия размером до 50 мкм (рис. 6, спектры 1, 2), частицы на основе кремния (рис. 6, спектры 3, 4). Эти включения являются тугоплавкими продуктами металлургических реакций, которые переходят в шов, практически не претерпевая изменений в термомеханических условиях сварки. В их состав также могут входить примесные и легирующие элементы такие, как сера, ниобий и титан.

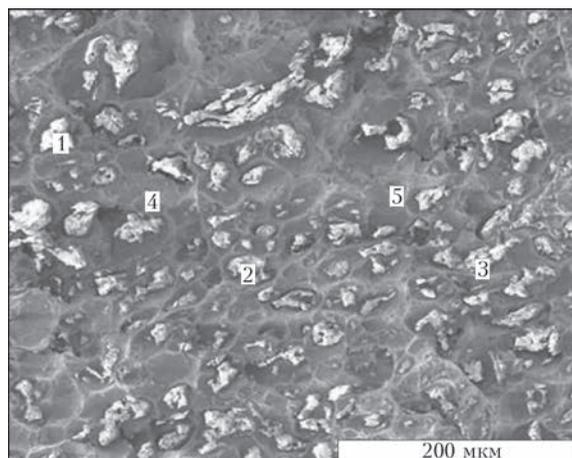
Другой тип наблюдаемых включений, образующих скопления — это силикаты. Участки с частицами силикатов, которые удалось наблюдать, занимали площадь до нескольких квадратных миллиметров. Оплавленный вид и многочисленность частиц дают основание предположить, что они представляют собой фрагменты раздробленной в стыке жидкой пленки (рис. 7).

Для оценки влияния неметаллических включений в стали на структуру и состав включений в



Спектр	C	O	Al	Si	S	Fe
1	37,48	26,42	14,67	3,23	0,88	17,32
2	66,53	19,9	–	0,25	–	13,30
3	22,66	0,72	–	72,67	–	3,94
4	39,47	2,23	–	46,02	–	12,27

Рис. 6. Тугоплавкие неметаллические включения на поверхности излома сварного соединения и результаты их микро-рентгеноспектрального анализа (здесь и далее ат. %)



Спектр	C	O	Al	Si	S	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe
1	5,89	60,91	2,19	11,83	0	0,17	0,82	0	16,63	1,57
2	11,50	56,43	6,40	12,94	0,41	0,70	1,02	0	9,28	1,33
3	1,02	55,44	2,39	16,09	0,10	0,11	0,50	0,02	22,84	1,50
4	4,81	1,39	0,04	0,58	0,08	0	0,24	0,19	1,92	90,76
5	3,64	0,82	0	0,29	0,11	0,19	0	0	1,86	93,08

Рис. 7. Марганцовистые алюмосиликаты на поверхности излома соединения труб

сварных швах были проведены металлографические исследования основного металла.

Микроструктура основного металла представляет собой ферритную матрицу с незначительным количеством перлитных колоний (рис. 8, а). Раз-

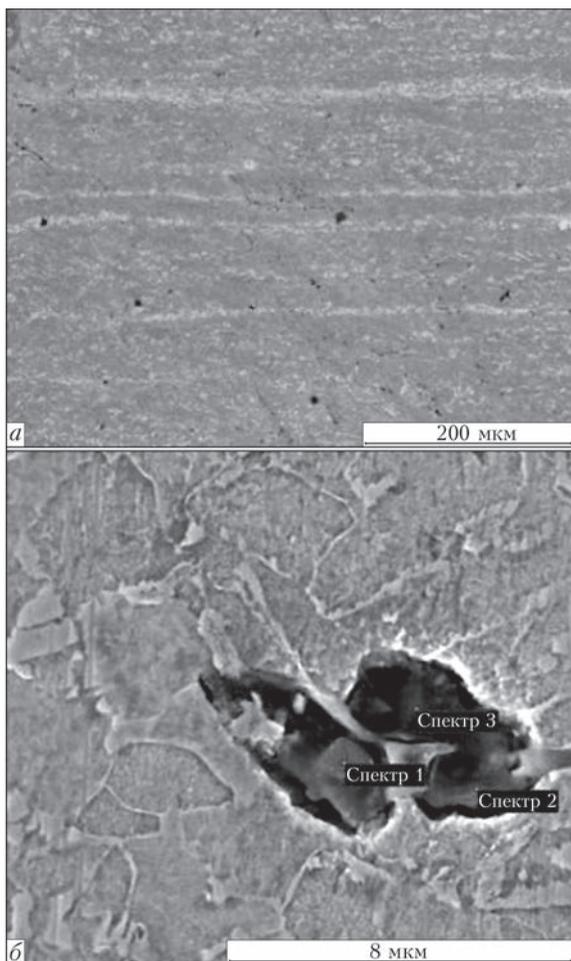
мер зерен феррита оценочно находится в пределах от нескольких до 10 мкм (балл 11...12 по ASTM), при этом крупные зерна феррита вытянуты вдоль направления прокатки. Характерным является значительный уровень полосчатости микроструктуры, которая наблюдается благодаря строчечному расположению продуктов эвтектоидного превращения.

Неметаллические включения, которые главным образом представлены комплексными оксидами и сульфидами алюминия, кремния, кальция, марганца, железа (рис. 8, б), в микроструктуре распределены неоднородно и зачастую сосредотачиваются в полосах прокатки.

Для определения влияния структурной неоднородности основного металла труб на ударную вязкость были проведены испытания образцов, вырезанных из основного металла при различном расположении надреза в образцах Шарпи относительно полос прокатки. Так, в случае надреза на поверхности трубы поперек направления прокатки при  $T_{исп} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$   $KCV = 333,0...3336,2/334,9$ , а при надрезе посередине поверхности торца трубы вдоль центральной линии прокатки  $KCV = (9,8...236,5)/53,5$  Дж/см<sup>2</sup>.

Испытания образцов основного металла на ударную вязкость при надрезе по центральной линии прокатки показали, что результаты не удовлетворяют требованиям [4, 5]. Характерные изломы образцов показаны на рис. 9.

Показатели испытаний образцов с надрезом вдоль полос прокатки отличаются резко выраженной нестабильностью. Из девяти образцов с надрезом по центральной линии прокатки у шести результаты были ниже требуемых 37,5 Дж/см<sup>2</sup> (при минимальном значении 9,8 Дж/см<sup>2</sup>). Как видно, в пределах полосы на отдельных участках ударная вязкость высокая. Локальное понижение пластических свойств вызвано структурной неоднородностью полосы проката. Однако это не мо-



Спектр	O	Al	Si	S	Ca	Mn	Fe
1	59,87	0,74	24,29	9,53	0,23	2,52	2,82
2	36,10	1,73	1,36	0	0,98	0	59,83
3	46,09	1,31	6,84	0,53	5,14	2,53	37,56

Рис. 8. Микроструктура основного металла (а) и неметаллических включений в основном металле (б)



Рис. 9. Поверхность излома ударных образцов Шарпи при надрезе по центральной линии прокатки: а —  $KCV = 9,8$  Дж/см<sup>2</sup>; б — 22,2; в — 30,8

жет ослабить металл даже в пределах участка, измеримого с толщиной листа.

На изломе основного металла, раскрытого по полосе прокатки, наблюдаются многочисленные включения (рис. 10). По своей природе они весьма близки к наблюдаемым в основном металле. Основой их являются оксидные структуры кремния, алюминия, марганца, оксиды и сульфиды железа.

Наиболее вероятно, что переход неметаллических включений из полос прокатки в плоскость соединения происходит через расплав, формирующийся на поверхности оплавления при сварке. Толщина слоя расплава при оплавлении низколегированных сталей изменяется в пределах 0,1...0,6 мм.

В работе [7] показано, что при наличии в оплавляемых торцах деталей отверстий, заполненных оксидами железа или какими-либо металлическими наполнителями, в месте их выхода на оплавляемые торцы в расплаве формируется участок, обогащенный наполнителем. При осадке этот участок расплава деформируется и многократно увеличивается его площадь.

В рассматриваемом случае формирования структурной неоднородности в плоскости роль наполнителя выполняет содержимое ликвационной полосы в месте ее выхода на поверхность оплавления.

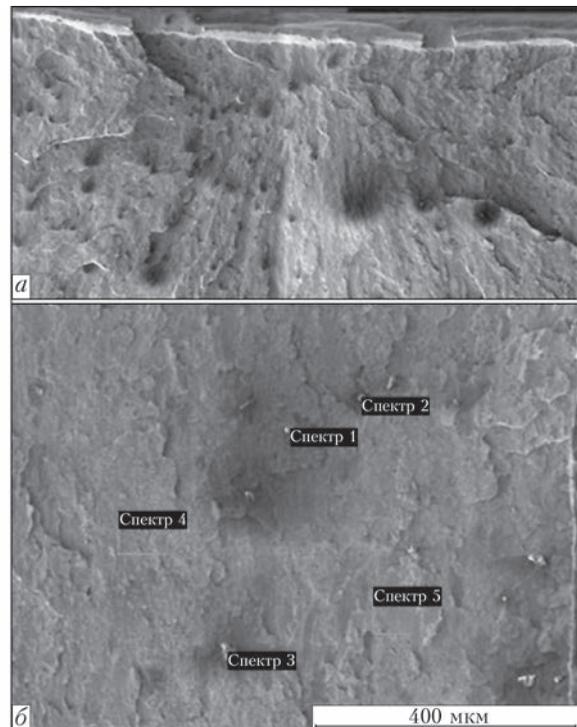
При оценке механических свойств сварных соединений труб большого диаметра в соответствии с нормативами [3, 4] рассматривают показатели испытаний стандартных образцов, вырезанных из секторов шириной 300 мм симметрично на четырех участках периметра трубы. При этом сравнивают результаты механических испытаний и показатели неразрушающего контроля. На основании анализа этих данных по каждому сектору делают вывод о допустимости отклонений показателей механических свойств и выявленных дефектов.

При испытаниях сварных соединений труб, выполненных КССО на оптимальных режимах, не было выявлено каких-либо отклонений от норма-

тивных требований по пределу прочности, а также при испытаниях на статический изгиб.

Для оценки распределения участков с низкими свойствами  $KCV$  в натурном образце была выполнена координатная привязка положения ударных образцов в испытуемом секторе трубы шириной 300 мм. На рис. 11 показаны результаты  $KCV_{40}$  по периметру и толщине сварного стыка.

Как видно, ударные образцы с показателями, ниже требуемых, не образуют колоний, а распре-



Спектр	O	Al	Si	S	Ca	Mn	Fe
1	63,20	0,04	19,42	0,51	4,65	2,48	9,70
2	29,10	0,15	0,40	8,43	3,82	2,12	55,98
3	6,88	1,98	0,27	2,41	0,32	0,13	88,01
4	8,27	0,62	0,49	1,21	1,75	1,56	86,10
5	11,15	0,47	1,66	4,62	0,23	1,86	80,01

Рис. 10. Макро- (а) и микроструктура (б) излома основного металла, раскрытого по полосе прокатки, и результаты микроанализа



Рис. 11. Результаты испытаний образцов по периметру и толщине сварного стыка на ударный изгиб при температуре испытаний  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

делены стохастически по сечению сварного соединения. Следовательно, сварное соединение не будет иметь протяженных явно ослабленных участков с точки зрения показателей вязкости.

Все приведенные данные дают основание считать, что наличие в сварных соединениях участков структурной неоднородности и соответственно локальное снижение показателей ударной вязкости на контрольном участке площади сварного соединения не следует рассматривать как браковочный признак при оценке качества соединений, выполненных КССО.

Стандартами [4, 8] для электродуговой сварки определены размеры допустимых дефектов и их суммарная протяженность на любом участке сварного шва длиной 300 мм при их неразрушающем контроле. Максимальная суммарная длина таких участков 50 мм, а ширина до 1,5 мм применительно к дефектам типа «непровар». Даже если принять, что участки со структурной неоднородностью при КССО близки к непроварам при дуговой сварке, то указанные выпадки показателей ударной вязкости в соединениях в стыковых швах находятся в допустимых по нормативу пределах. В действительности механические свойства участков со структурной неоднородностью значительно выше и не содержат несплошностей, где металлическая связь вообще отсутствует.

Поэтому наличие отдельных выпадков показателей ударной вязкости при низких температурах испытаний не следует относить к браковочным признакам.

### Выводы

1. Проведены всесторонние механические испытания соединений труб из высокопрочных сталей, выполненных КССО. Качество соединений полностью удовлетворяет требованиям международного стандарта API STANDART 1104. Установлено, что при испытаниях на ударный изгиб наблюдались отдельные выпадки показателей  $KCV_{-40}$  ниже

уровня, требуемого стандартами DNV-OS-F101 и СТО Газпром 2-3.7-380-2009.

2. Средствами неразрушающих методов контроля сварных соединений в соединениях с низкими показателями  $KCV_{-40}$  не выявлено каких-либо дефектов сварки. Установлено, что снижение показателей  $KCV_{-40}$  обусловлено формированием в плоскости соединения участков площадью 1...2 мм<sup>2</sup>, отличающихся структурной неоднородностью, характерной и для основного металла, которая проявляется в резко выраженной анизотропии его пластических свойств.

3. Показано, что участки со структурной неоднородностью не образуют колоний, а распределены стохастически по сечению сварного соединения, поэтому они не снижают общую работоспособность сварного соединения. Размеры таких участков не превышают допустимых значений, принятых стандартами для дефектов швов, полученных при дуговой сварке.

4. Наличие отдельных локальных выпадков показателей  $KCV_{-40}$ , наблюдаемых при испытаниях сварных соединений, которые выполнены КССО, не следует считать браковочным признаком.

1. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка трубопроводов. – Киев: Наук. думка, 1986. – 206 с.
2. API STANDART 1104. Welding of pipelines and related facilities, 21st Edition.
3. DNV-OS-F101. Offshore standart. Submarine pipelines systems. – Jan. 2000.
4. Инструкция по технологии сварки морских газопроводов: СТО Газпром 2-3.7-380-2009. – М., 2009.
5. Контактная стыковая сварка оплавлением толстостенных труб из высокопрочных сталей класса прочности K56 / С.И.Кучук-Яценко, Ю.В.Швец, В.Ф.Загадарчук и др. // Автомат. сварка. – 2012. – № 5. – С. 5-11.
6. Технология термической обработки соединений труб из стали категории прочности K56, сваренных контактной стыковой сваркой оплавлением / С.И.Кучук-Яценко, Ю.В.Швец, В.Ф.Загадарчук и др. // Там же. – 2013. – № 2. – С. 3-8.
7. Образование «матовых пятен» в соединении, выполненном контактной сваркой / С.И.Кучук-Яценко, Б.И.Казымов, В.Ф.Загадарчук и др. // Там же. – 1984. – № 11. – С. 23-26.
8. Инструкция по неразрушающему контролю сварных соединений при строительстве сухопутных и подводных газопроводов из сталей X-80, X-100: СТО Газпром 22.4-359 – 2009. – М., 2009. – 195 с.

Поступила в редакцию 29.10.2014



## ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ТИПА 50X9C3Г С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ СЕРЫ

**В. В. ОСИН**

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Стали, легированные серой (например, «сильхром»), широко применяются при изготовлении инструментов холодного деформирования металла. Для их восстановительного ремонта необходимы материалы, обеспечивающие близкий основному металлу химический состав наплавленного металла. В работе исследовано влияние серы на триботехнические свойства наплавленного металла типа 50X9C3Г. Содержание серы в наплавленном металле изменяли в пределах 0,02...1,7 %. В результате исследований установлено, что сера образует сложные сульфиды, которые препятствуют схватыванию трущихся металлических поверхностей, увеличивая тем самым износостойкость наплавленных образцов. Для обеспечения оптимальных триботехнических свойств наплавленного металла объемное содержание сложных сульфидов основных легирующих элементов должно быть в пределах 1,5...2,0 %, а их размеры  $\leq 0,02$  мм. Это условие обеспечивается при общем содержании серы в наплавленном металле 0,5...0,8 %. При меньшем содержании серы количество образующихся сульфидов недостаточно для того, чтобы оказать существенное влияние на свойства наплавленного металла. При большем ее содержании образующиеся крупные включения сульфидов хуже удерживаются матрицей наплавленного металла и в процессе испытаний выкрашиваются и удаляются из зоны изнашивания. Это отрицательно сказывается на износостойкости наплавленного металла и контактирующей детали. Библиогр. 10, табл. 2, рис. 3.

*Ключевые слова:* наплавка, наплавленный металл, легирование серой, сульфиды, триботехнические свойства

Сталь 50X9C3Г, известная под торговой маркой «сильхром», достаточно широко применяется для изготовления инструментов холодного деформирования металла, в частности, для штампов глубокой холодной вытяжки, а также для тяжело нагруженных деталей некоторых пар трения. Процесс эксплуатации этих деталей характеризуется значительными механическими нагрузками и выходят они из строя чаще всего в результате изнашивания схватыванием. Для восстановительной наплавки штампов холодной вытяжки в ИЭС им. Е. О. Патона разработана порошковая проволока ПП-Нп-50X9C3Г, обеспечивающая получение наплавленного металла по составу аналогичного основному металлу [1]. Однако остается актуальной проблема увеличения сопротивления схватыванию наплавленного металла этого типа.

Из научно-технической литературы [2–8] и проведенных ранее исследований износостойкости при различных видах изнашивания наплавленного металла 25X5M3ФС [9], легированного серой, известно, что включения сложных сульфидов препятствуют изнашиванию схватыванием, снижают коэффициент трения, улучшают качество изнашиваемых поверхностей наплавленного металла. Была поставлена задача улучшить триботехнические характеристики наплавленного металла типа 50X9C3Г за счет легирования серой.

Учитывая опыт проведенных ранее исследований [9], содержание серы в наплавленном металле этого типа изменяли в пределах 0,02...1,3 % (табл. 1).

Для оценки износостойкости и коэффициента трения наплавленного металла использовали универсальный узел машины трения, предназначенный для лабораторно-экспериментальной оценки триботехнических свойств пар трения при комнатной и повышенных температурах [10]. Схватывание оценивали по наличию или отсутствию увеличения массы контртела или образца. Испытания проводили методом истирания лунок по схеме «вал–плоскость» без дополнительной подачи смазки в зону трения. Образцы для триботехнических исследований, вырезанные из третьего-четвертого слоя наплавленного металла, имели размеры 3×17×25 мм. Изнашиваемая поверхность 3×25 мм. Контртело в виде кольца диаметром 40 мм и шириной 12 мм было изготовлено из закаленной стали 45 с твердостью *HRC* 42.

**Таблица 1.** Химический состав и твердость металла, наплавленного опытными порошковыми проволоками

Условное обозначение порошковой проволоки	Массовая доля элементов, %					Твердость <i>HRC</i>
	C	Mn	Si	Cr	S	
ПП-Нп-50X9C3Г-Оп-1	0,55	0,52	2,65	9,23	0,02	56
ПП-Нп-50X9C3Г-Оп-2	0,50	0,81	2,80	9,04	0,27	58
ПП-Нп-50X9C3Г-Оп-3	0,64	0,55	2,65	9,25	0,70	58
ПП-Нп-50X9C3Г-Оп-4	0,62	0,52	2,80	8,65	1,05	55
ПП-Нп-50X9C3Г-Оп-5	0,67	0,58	2,65	8,80	1,30	56

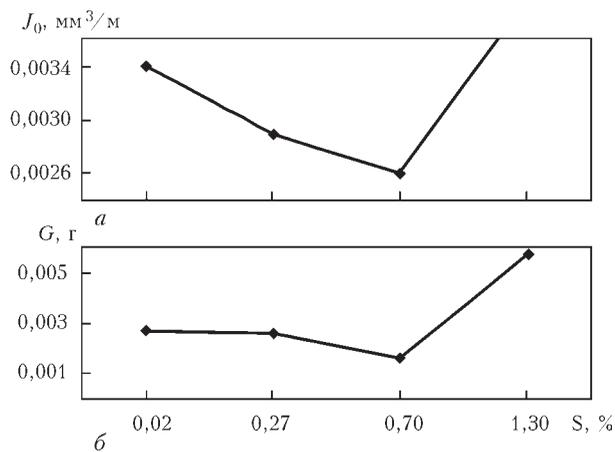


Рис. 1. Износ образцов наплавленного металла типа 50X9C3Г с различным содержанием серы (а) и контртел, испытанных в паре с ними (б)

По результатам предварительных исследований выбрали следующий режим испытаний: скорость скольжения 0,06 м/с, нагрузка 30 Н, продолжительность испытания после приработки 60 мин, путь трения около 227 м. Этот режим обеспечивал стабилизацию во времени триботехнических характеристик всех исследованных материалов. При испытаниях износ образца определяли по объему вытертой лунки, износ контртела — по разнице его массы до и после испытания.

Характеристики изнашивания наплавленных образцов и контртел при трении металла по металлу при комнатной температуре представлены на рис. 1. Как видно из приведенных данных, износ наплавленного металла типа 50X9C3Г при трении металла по металлу при комнатной температуре сначала снижается с увеличением содер-

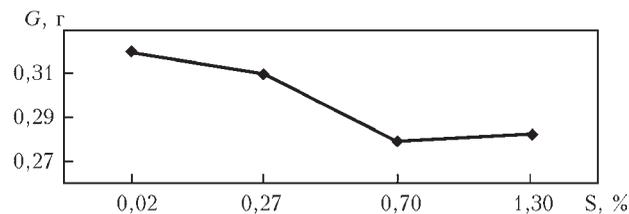


Рис. 2. Влияние серы на коэффициент трения наплавленного металла типа 50X9C3Г

жания серы до 0,7 %, а затем, при увеличении ее содержания до 1,3 %, износ снова растет. Износ контртел подобен износу образцов наплавленного металла. Износа схватыванием не обнаружено, что видно из результатов испытаний. В паре трения образец-контртело наилучшая износостойкость обеспечивалась при содержании серы в пределах 0,5...0,8 %. При увеличении содержания серы в образце до 1,3 % износ контртел также несколько увеличивается.

Исследовали влияние серы на коэффициент трения наплавленного металла 50X9C3Г (рис. 2). Коэффициент трения наплавленного металла снижается до содержания серы 0,7 %, а затем, с увеличением содержания серы до 1,3 %, остается примерно на одном уровне. Как и для изнашивания, оптимальным следует считать содержание серы 0,5...0,8 %.

Схожая зависимость износа образцов от содержания серы наблюдалась и в работе [9]. По-видимому, износостойкость образцов и как следствие износостойкость контртел, связана с морфологией и количеством сульфидных включений.

Было проведено исследование микроструктуры наплавленного металла 50X9C3Г с различным содержанием серы. Микроструктура наплавленного металла 50X9C3Г без серы состоит из мартенсита и остаточного аустенита, есть небольшое количество неметаллических включений — силикатов и оксидов (рис. 3, а).

С введением 0,27 % серы в микроструктуре наплавленного металла появляются включения сульфидов и оксисульфидов (рис. 3, б). С дальнейшим увеличением содержания серы до 0,7 % происходит измельчение структуры наплавленного металла, при этом количество и размер сульфидов и оксисульфидов увеличивается (рис. 3, в). В образцах с содержанием серы 1,3 % наблюдается множество отдельных сульфидов глобулярной и вытянутой формы, а также скопления мелких сульфидов (рис. 3, г). Выявлены также немногочисленные очень крупные сульфиды и оксисульфиды, силикатов практически не наблюдается.

Влияние содержания серы на объемную долю неметаллических включений изучали на нетравленных полированных шлифах на коли-

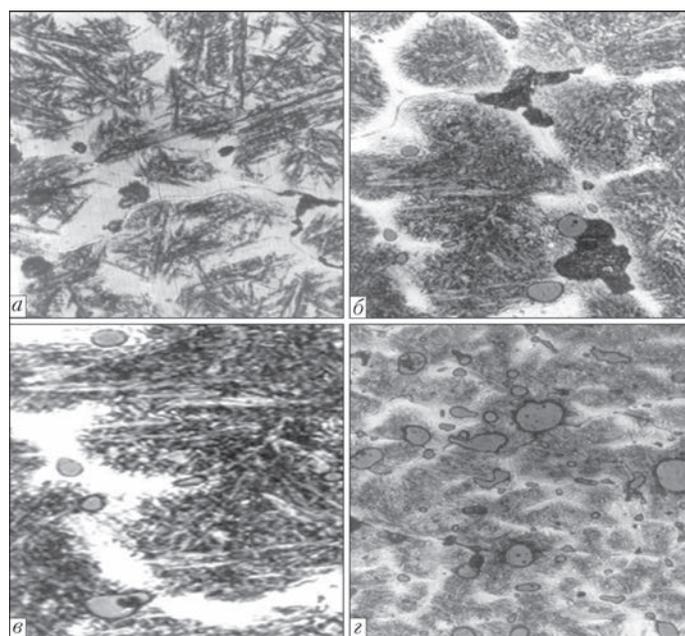


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 1000$ ) наплавленного металла типа 50X9C3Г с различным содержанием серы, %: а — 0,02; б — 0,27; в — 0,7; г — 1,3



**Таблица 2. Состав сульфидной фазы наплавленного металла 50X9C3Г с 0,7 % S**

Тип наплавленного металла	Участок анализа	Массовая доля элементов, %				
		S	Si	Mn	Cr	Fe
50X9C3Г	Сульфид	12,53	1,22	28,81	13,15	44,28
	Матрица	0,03	3,40	0,59	9,27	86,26

чественном анализаторе «Omnimet» при увеличении 600 при просмотре 100 полей зрения. При содержании в наплавленном металле 0,7 % серы объемная доля сульфидов в верхних наплавленных слоях достигает 1,99 % (по объему), а при содержании серы  $1,3 \leq 3,21$  %.

Размеры сульфидных включений больше, чем силикатных, причем, с увеличением содержания серы размер сульфидных включений растет. При содержании серы 0,7 % размер сульфидных включений составляет 0,007...0,02 мм, а при содержании серы 1,3 % — 0,025...0,05 мм, были также обнаружены единичные включения размером 0,075 мм.

Микротвердость неметаллических включений определяли на твердомере М-400 фирмы «LECO», при нагрузке 10 г. Сульфиды имеют существенно меньшую микротвердость, чем силикаты, средняя микротвердость сульфидов 2835 МПа, а силикатов 9130 МПа. Результаты микрорентгеноспектрального анализа показывают, что марганец и хром активно реагируют с серой, составляя почти половину объема сульфидной фазы (табл. 2). Велика также доля сульфидов железа, кремний, в основном, входит в состав сложных сульфидов.

Сопоставляя результаты исследований микроструктуры наплавленного металла 50X9C3Г с результатами исследований его износостойкости, можно сделать вывод, что для обеспечения оптимальных триботехнических свойств наплавленного металла 50X9C3Г объемная доля в его структуре сложных сульфидов основных легирующих элементов должна находиться в пределах 1,5...2,0 %, а их размеры  $\leq 0,02$  мм. Для выполнения этих условий необходимо, чтобы содержание серы в наплавленном металле составляло 0,5...0,8 %.

При меньшем содержании серы количество образующихся сульфидов недостаточно для того, чтобы оказывать существенное влияние на свойства наплавленного металла 50X9C3Г. При большем ее содержании образующиеся крупные включения сульфидов плохо удерживаются матрицей наплавленного металла и в процессе испытаний выкрашиваются и удаляются из зоны изнашивания. Это отрицательно сказывается на износостойкости наплавленного металла и ответной детали. Кроме того, выкрашиванию сульфидов может способствовать совокупность низкой микротвердости и большой объемной доли сульфид-

ных включений, что может приводить к неспособности противостоять большим контактными давлениям в зоне трения.

### Выводы

1. Установлено, что при легировании серой наплавленного металла 50X9C3Г сульфиды основных легирующих элементов препятствуют схватыванию изнашиваемых поверхностей в условиях сухого трения металла по металлу.

2. Для обеспечения оптимальных триботехнических свойств наплавленного металла 50X9C3Г необходимо, чтобы в его структуре объемная доля сложных сульфидов составляла 1,5...2,0 %, а их размеры были  $\leq 0,02$  мм. Для выполнения этого условия содержание серы в наплавленном металле должно находиться в пределах 0,5...0,8 %. При меньшем ее содержании сульфиды не могут существенно влиять на триботехнические свойства наплавленного металла. При большем образующиеся крупные сульфиды плохо удерживаются матрицей наплавленного металла и в процессе износа выкрашиваются и удаляются из зоны изнашивания, что отрицательно влияет на износостойкость.

1. *Рябцев И. А., Кондратьев И. А.* Механизированная электродуговая наплавка деталей металлургического оборудования. – Киев: Екотехнологія, 1999. – 62 с.
2. *Подшипниковые* сульфидированные металлокерамические материалы на основе нержавеющей сталей / И. М. Федорченко, Л. И. Пугина, И. Г. Слысь и др. // Трение и изнашивание при высоких температурах. – М.: Наука, 1973. – С. 115–120.
3. *Виноградов Ю. М.* Сульфидирование, селенирование и теллурирование сталей, чугуна и сплавов // Металловедение и терм. обработка металлов. – 1965. – № 10. – С. 36–41.
4. *Влияние* температуры на характеристики трения некоторых сульфидов, селенидов и теллуридов тугоплавких металлов / М. С. Ковальченко, В. В. Сычев, Ю. Г. Ткаченко и др. // Трение и изнашивание при высоких температурах. – М.: Наука, 1973. – С. 133–138.
5. *Артамонов А. Я., Барсегян Ш. Е., Репкин Ю. Д.* Исследование смазочных свойств дисульфидов молибдена и вольфрама // Порошковая металлургия. – 1968. – № 12. – С. 53–58.
6. *Самсонов Г. В., Барсегян Ш. Е., Ткаченко Ю. Г.* О механизме смазочного действия сульфидов и селенидов тугоплавких металлов // Физ.-хим. механика материалов. – 1973. – 9, № 1. – С. 58–61.
7. *Лунев В. В., Аверин В. В.* Сера и фосфор в стали. – М.: Металлургия, 1988. – 256 с.
8. *Рябцев И. А., Осин В. В.* Влияние серы на свойства сплавов на основе железа и перспективы ее использования в наплавочных материалах // Автомат. сварка. – 2004. – № 10. – С. 22–26.
9. *Рябцев И. А., Осин В. В.* Исследование влияния серы на свойства наплавленного металла типа X5MFC // Там же. – 2006. – № 12. – С. 14–18.
10. *Рябцев И. И., Черняк Я. П., Осин В. В.* Блочная установка для испытаний наплавленного металла // Сварщик. – 2004. – № 1. – С. 18–20.

Поступила в редакцию 20.10.2014



## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО СОЕДИНЕНИЙ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Л. Ю. ДЕМИДЕНКО, Н. А. ОНАЦКАЯ, В. Д. ПОЛОВИНКА

Ин-т импульсных процессов и технологий НАНУ. 54018, г. Николаев, просп. Октябрьский, 43а.

E-mail: iipt@iipt.com.ua

В настоящее время для качественного соединения разнородных металлов все большее распространение получают способы сварки давлением. В Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины разработан новый способ сварки металлов в твердом состоянии с использованием импульсов тока. Сущность его заключается в том, что свариваемые металлы при температуре окружающей среды сжимают под давлением и для интенсификации пластической деформации на стадии образования физического контакта через зону деформации пропускают определенное количество импульсов тока с амплитудой плотности не менее  $1,2 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup> длительностью не менее  $2 \cdot 10^{-4}$  с. При этом взаимная деформация поверхностного рельефа обеспечивает достаточно плотный контакт свариваемых поверхностей, что позволяет изолировать их от окружающей среды и при последующем нагреве образуется сварное соединение по типу диффузионного без применения специальной защиты свариваемых поверхностей от окисления. Цель настоящей работы — исследование влияния температуры термомеханической обработки на качество соединений при сварке разнородных металлов в твердом состоянии с использованием импульсов тока большой плотности. При этом используют такие методы исследований, как механические испытания на срез, оптическую металлографию, микрорентгеноспектральный анализ. В результате экспериментальных исследований установлено, что для обеспечения качественного сварного соединения сталь 20 + медь М1 наиболее благоприятной является температура 800 °С, так как при этом в зоне соединения отсутствуют несплошности, а в самом металле сохраняется четко выраженная исходная структура. Библиогр. 9, табл. 3, рис. 5.

*Ключевые слова:* сварные соединения разнородных металлов, температура термомеханической обработки, импульсы тока большой плотности, самогерметизация межконтактной зоны, металлографические исследования, механические испытания на срез

В современном промышленном производстве для изготовления сварных изделий характерно применение разнородных по своим свойствам металлов и сплавов [1, 2]. Это позволяет наиболее полно использовать специфические свойства каждого из них, снижать расход дорогих и дефицитных металлов, изготавливать изделия с высокими эксплуатационными качествами и уменьшать их массу. В этой связи актуальна разработка новых, эффективных и малоэнергоёмких технологических процессов получения качественных сварных соединений из разнородных металлов.

В Институте импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины разработан новый способ сварки металлов в твердом состоянии с применением импульсов тока [3], который является разновидностью сварки давлением с подогревом. Сущность его заключается в том, что свариваемые металлы при температуре окружающей среды сжимают под давлением и для интенсификации пластической деформации на стадии образования физического контакта через зону деформации пропускают определенное количество импульсов тока с амплитудой плотности не менее  $1,2 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup> длительностью не менее  $2 \cdot 10^{-4}$  с. При этом взаимная

деформация поверхностного рельефа обеспечивает достаточно плотный контакт свариваемых поверхностей, что позволяет изолировать их от окружающей среды и при последующем нагреве образуется сварное соединение без применения специальной защиты свариваемых поверхностей от окисления [4].

Для сварки разнородных металлов предложенным способом были выбраны сталь 20 и медь М1, поскольку они, во-первых, широко применяются при изготовлении технических изделий в электротехнике, транспорте, машиностроении, во-вторых, значительно различаются по своим физико-механическим свойствам и кристаллографическим характеристикам. Взаимная растворимость этих металлов сравнительно небольшая и зависит от температуры [5], поэтому представлялось целесообразным исследовать ее влияние на качество полученных сварных соединений.

Целью настоящей работы является исследование влияния температуры термомеханической обработки (ТМО) на качество соединений при сварке разнородных металлов в твердом состоянии с использованием импульсов тока большой плотности.



**Материалы и методика проведения эксперимента.** В качестве модельных образцов для сварки разнородных металлов с использованием импульсов тока большой плотности были выбраны прямоугольные пластины длиной 170, шириной 12 и толщиной 2,5 мм, причем зона сварки, равная длине  $l \approx 22$  мм, выбиралась посередине образца (рис. 1).

Непосредственно перед сваркой осуществляли механическую подготовку поверхностей пластин, заключающуюся в их шлифовке до высоты гребешков (микронеровностей)  $H_0 = 5 \dots 6$  мкм. Затем поверхности пластин обезжировали ацетоном. Пластическую деформацию микровыступов на контактных поверхностях осуществляли при температуре окружающей среды (комнатной) сжатием образцов в специальном приспособлении при расчетном номинальном давлении, равном 50 МПа. Обработку импульсным током зоны контакта сжатых пластин осуществляли путем пропускания тока по одной стальной пластине, параметры импульсного тока были такими же, как в работе [4], а именно: амплитуда плотности тока  $J = 1,85 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup>; длительность импульса (затухающая синусоида)  $\tau \approx 3 \cdot 10^{-4}$  с; количество импульсов  $N = 90$ , частота следования импульсов 0,5 Гц.

Образцы, прошедшие обработку импульсным током, вместе с приспособлением помещали в камерную электропечь для последующего нагрева.

Для определения влияния температуры ТМО на качество полученных сварных соединений их нагревали в печи до температуры сварки, которую согласно [6] выбирали в диапазоне 0,5...0,7 от температуры плавления, т. е. при 750, 800 и 850 °С и выдержке в течение 20 мин при указанной температуре. Количество образцов для каждого уровня температур — не менее трех.

О качестве соединений судили по результатам металлографических исследований и механических испытаний темплетов, вырезанных из зоны контакта сварных образцов (рис. 1). При этом каждый темплет разрезали в поперечном сечении. Одну часть темплетов использовали для металлографических исследований, другую — для механических испытаний.

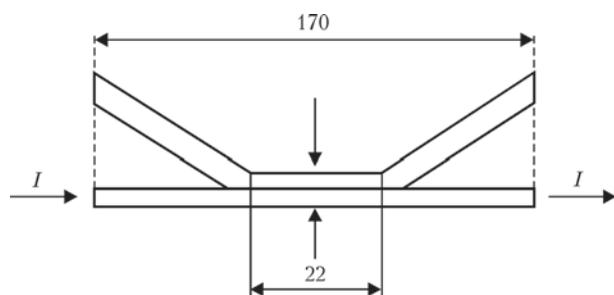


Рис. 1. Схема сжатия образцов для обработки импульсами тока

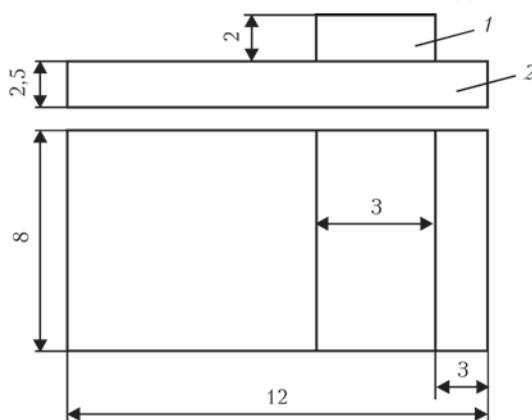


Рис. 2. Схема образца для испытаний на срез: 1 — участок медной пластины; 2 — стальная пластина

Микрошлифы для металлографических исследований изготавливали перпендикулярно к плоскости контакта. Подготовка шлифов к исследованиям состояла из механической шлифовки, полировки и последующего травления в 4 % спиртовом растворе нитала [7].

Качество сварного соединения предварительно оценивали по состоянию границы вдоль линии соединения (на наличие несплошностей). При этом оценку состояния границы производили по ее ширине, определяемой с помощью металлографического микроскопа «Микротех» модели ММО-1600 при 400-кратном увеличении. При наличии несплошностей по линии соединения, представляющих собой микронесплавления, производили их измерение при 1000-кратном увеличении в 100 точках, равномерно распределенных вдоль линий соединения. По их результатам вычисляли долю (в процентном выражении) по линии соединения тех или иных значений ширины границы.

Распределение (диффузия) химических элементов исследовали методом микрорентгеноспектрального анализа в поперечном сечении от основного металла до линии соединения, а также вдоль линии соединения со стороны меди.

Механические испытания на прочность (на срез) проводили согласно ГОСТу 10885–85 с целью определения напряжений, при которых происходит деформация сдвига с разрушением сварного соединения по линии сварки. Для этого из части темплетов изготавливали образцы для испытаний (рис. 2).

Испытания проводили на лабораторном стенде, предназначенном для исследования статических характеристик материалов и разработанном в ИИПТ НАН Украины, с помощью приспособления, схема которого приведена на рис. 3. Это приспособление позволяет при приложении к направляющим и растягивающим усилий  $F_s$  обеспечить на испытываемой площадке образца напряжения чистого сдвига. Нагружение образцов проводили

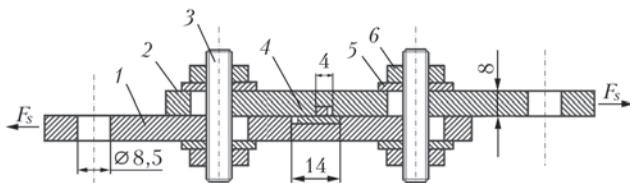


Рис. 3. Схема приспособления для испытаний образцов на срез: 1, 2 — соответственно нижняя и верхняя направляющая; 3 — шпилька; 4 — сварной образец; 5 — шайба; 6 — гайка

ступенчато с выдержкой на каждой ступени в течение 3 мин.

Прочность соединений оценивали по напряжениям среза  $\tau_{cp} = F_{cp} / S_{cp}$ , где  $F_{cp}$  — усилие среза испытуемого участка, кН;  $S_{cp}$  — площадь срезаемого участка, мм<sup>2</sup>.

**Результаты экспериментов и их обсуждение.**

Результаты ранее проведенных исследований изменений поверхностного рельефа под действием импульсного тока по указанной выше схеме пропускания тока с помощью сканирующего электронного микроскопа марки СЭМ 515 фирмы «Philips» (Голландия) показали, что обработка импульсами тока большой плотности предварительно сжатых пластин металлов сталь 20 + медь М1 приводит к значительной деформации их поверхностного рельефа, в результате чего обеспечивается образование площади физического контакта от 60 до 80 % общей площади контактной поверхности [4]. Взаимная деформация поверхностного рельефа применительно к исследуемому способу сварки обеспечивает достаточно плотный контакт свариваемых поверхностей, что позволяет изолировать их от окружающей среды и создает возможность при последующем нагреве получить сварное соединение без применения защитной среды, что подтверждено экспериментально в той же работе.

Повышение температуры на стадии объемного взаимодействия необходимо для искусственного увеличения пластичности свариваемых металлов и ускорения диффузионных процессов. Кроме того, термообработка интенсифицирует диффузионное растворение кислорода из приповерхностного слоя в глубь металла, в результате окисированный слой рассасывается и перестает играть роль барьера для выхода дислокаций в зону соединения. Скорости активации и схватывания контактных поверхностей при этом увеличиваются, и происходит развитие взаимодействия соединяемых металлов как в плоскости контакта с образованием прочных металлических связей, так и в объеме зоны контакта.

Усредненные результаты измерений напряжений среза сварных соединений, полученных при разных температурах, представлены в табл. 1.

Для сравнения прочности сварных соединений с основным металлом образец из основного металла (в данном случае меди), подобный свар-

Таблица 1. Результаты механических испытаний на срез темплетов сварного соединения сталь 20 + медь М1

Температура термообработки $T, ^\circ\text{C}$	Напряжение среза $\tau_{cp}$ , МПа	Относительное напряжение среза $\bar{\tau}_{cp}$
750	176,0±6,2	0,96
800	180,7±3,5	0,98
850	174,2±5,1	0,95

ному (см. рис. 2), подвергали термодформационному воздействию, имитирующему условия сварки, и испытывали по аналогичной методике. Таким образом, определяли относительное напряжение среза  $\bar{\tau}_{cp}$  для всех исследуемых температур сварки

$$\bar{\tau}_{cp}(T) = \tau_{cp}(T) / \tau(T),$$

где  $\tau_{cp}(T)$  — напряжение среза, полученного при температуре сварки, МПа;  $\tau(T)$  — прочность на срез основного металла после термического воздействия по режиму сварки, МПа.

Расчетные значения относительного значения напряжения среза приведены в табл. 1.

Согласно результатам механических испытаний установлено, что при изменении температуры сварки от 750 до 850 °С прочность на срез полученных сварных соединений изменяется в узком интервале от 174,2 до 180,7 МПа, что соответствует от 0,95 до 0,98 прочности меди.

Микроструктуры зон полученных сварных соединений представлены на рис. 4, а результаты измерения ширины границы и ее доли по линии соединения — в табл. 2. Из таблицы видно, что повышение температуры ТМО приводит не только к уменьшению ширины границы, но и к увеличению количества точек по линии соединения, в которых зафиксирована минимальная ее ширина. Так, при температуре ТМО 750 °С 8 % исследованной длины линии соединения имеют дефекты размером от 0,5 до 1,0 мкм, остальные 92 % имеют ширину границы менее 0,5 мкм. При более высоких температурах (800 и 850 °С) дефекты типа пор, несплошностей в зоне соединения уже отсутствуют, а сама зона соединения представляет собой ориентированную в плоскости первоначального контакта межзеренную границу (рис. 4, б, в).

Таблица 2. Ширина границы и ее процентное содержание по линии соединения при разных температурах ТМО

Температура термообработки $T, ^\circ\text{C}$	Ширина границы, мкм		
	1,0	~ 0,5	< 0,5
750	7	1	92
800	-	-	100
850	-	-	100

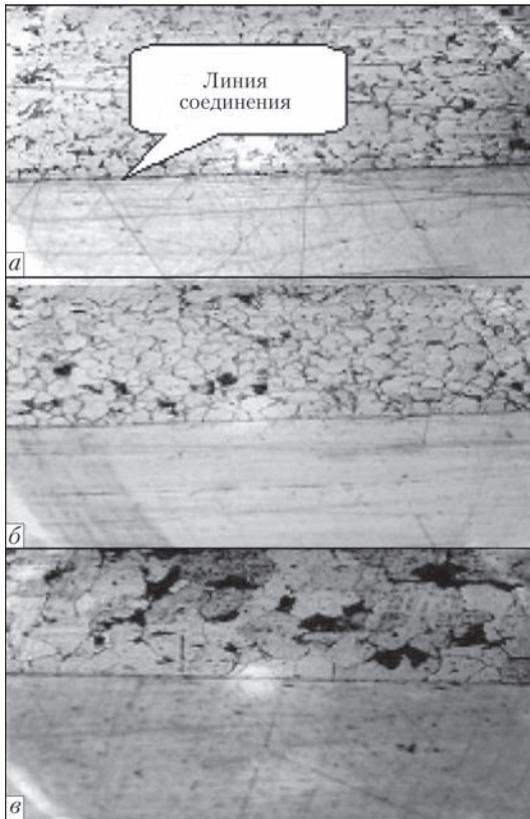


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 400$ ) зон сварных соединений сталь 20 + медь М1 при  $T = 750$  (а), 800 (б) и 850 °С (в)

Однако, сопоставляя микроструктуры полученных сварных соединений, следует отметить, что повышение температуры ТМО до 850 °С приводит к росту зерен в стали 20 как в зоне соединения, так и в основном металле (рис. 4, в), что нежелательно, поскольку может привести к снижению прочностных характеристик сварного соединения.

На основании результатов металлографических исследований можно сделать вывод, что температура ТМО 800 °С наиболее предпочтительна для обеспечения качественного сварного соединения сталь 20 + медь М1, поскольку при этом

Таблица 3. Распределение химических элементов вдоль линии соединения со стороны меди ( в %) на глубине около 10 мкм

Номер точки	Cu	Fe	Cr	Mn	Ni
1	99,60	0,38	-	-	0,02
2	97,82	2,12	0,06	-	-
3	96,84	2,74	-	0,11	0,32
4	96,82	3,14	-	0,03	0,02
5	97,22	2,45	-	0,13	0,2
6	96,40	3,27	0,12	0,02	0,22
7	96,85	3,08	-	-	0,07
8	96,56	3,13	0,02	0,05	0,25

в зоне соединения отсутствуют несплошности, в самом металле сохраняется четко выраженная исходная структура, при этом зона соединения представляет собой ориентированную в плоскости первоначального контакта межзеренную границу.

Проведенный микрорентгеноспектральный анализ характера распределения основных химических элементов в поперечном сечении центральной области сварного образца, полученного после ТМО при температуре 800 °С в течение 20 мин, свидетельствует о том, что в приконтактной зоне соединения изменяется химический состав от 100 % Fe (или Cu) к 100 % Cu (или Fe) (рис. 5). При этом глубина проникновения меди (концентрацией до 1 %) в металл стали 20 около 15 мкм от линии соединения, а железа в медь примерно до 13 мкм. Полученные результаты полностью согласуются с современными представлениями о том, что для металлов с ограниченной взаимной растворимостью характерно появление диффузионных зон на границе соединения [8]. Их образование связано с тем, что в железо через границу раздела в результате определенной растворимости проникает (диффундирует) некоторое количество атомов меди. Аналогично в медь диффундирует некоторое количество атомов железа (табл. 3).

Результаты, представленные в табл. 3 и на рис. 5, показывают, что вдоль линии соединения и в поперечном сечении образуются зоны твердых растворов как со стороны стали 20, так и со стороны меди М1, что свидетельствует о протекании процессов межатомного взаимодействия контактирующих поверхностей. При этом в этих зонах не обнаружены фазовые образования, способные привести к охрупчиванию сварного соединения.

Таким образом, исследуемый способ сварки позволяет получить качественные сварные соединения сталь 20 + медь М1 при более низких термомеханических параметрах, чем при традиционной диффузионной сварке, причем без применения специальной защиты свариваемых поверхностей от окисления, например, вакуумирования или использования контролируемой

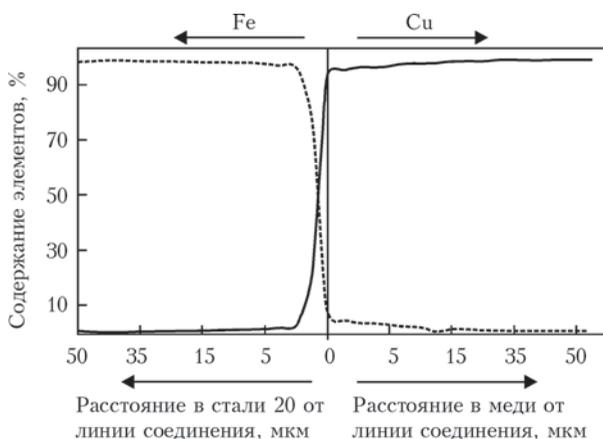


Рис. 5. Характер распределения основных химических элементов в поперечном сечении центральной области сварного образца сталь 20 + медь М1 после ТМО при  $T = 800$  °С



атмосферы из инертного газа. Изоляция зоны сварки от окружающей среды при сварке с использованием импульсов тока обеспечивается в результате самогерметизации межконтактной зоны благодаря интенсивной пластической деформации поверхностных слоев соединяемых металлов, стимулированной импульсами тока. При последующем нагреве в герметизированном пространстве образуется автовакуум, способствующий самоочистке поверхностей от оксидных пленок [9] и образованию сварного соединения.

### Выводы

1. Для сварки разнородных материалов сталь 20 и медь М1 в твердом состоянии с использованием импульсов тока наиболее благоприятной является температура ТМО 800 °С, так как при этом в зоне соединения отсутствуют дефекты типа несплошностей, а в самом металле сохраняется четко выраженная исходная структура.

2. Показано, что вдоль линии соединения в поперечном сечении образуются зоны твердых растворов как со стороны стали 20, так и со стороны меди М1. При этом в этих зонах не обнаружены фазовые образования, способные привести к охрупчиванию сварного соединения.

3. Результаты механических испытаний свидетельствуют, что полученные сварные соединения имеют достаточно высокую прочность на срез, сопоставимую с прочностью основного металла.

1. Миддельдорф К., Д. фон Хофе. Тенденция развития технологий соединения материалов // Автомат. сварка. – 2008. – № 11. – С. 39–47.
2. Reisinger U., Stein L., Steiners M. Stahl-Aluminium-Mischverbindungen: Schweißen oder Löten? Die Kombination zweier etablierter Fügetechnologien macht Unmögliches möglich // Schweißen und Schneiden. – 2010. – 62, № 5. – S. 278–284.
3. Пат. 79181 Україна. МПК В23К 31/02. Спосіб дифузійного зварювання металів /В. Д. Половинка, Є. С. Юрченко, О. І. Вовченко. – Опубл. 25.05.07, Бюл. № 7.
4. Вовченко А. И., Демиденко Л. Ю., Онацкая Н. А. Интенсификация пластической деформации поверхностей металлов под действием импульсов тока при сварке давлением // Міжвуз. збірник «Наукові нотатки». – Луцьк, 2011. – 32. – С.63–68.
5. Kurt A., Uygun E., Mutlu E. The effect of allotropic transformation temperature in diffusion-welded low-carbon steel and copper // Metallofiz. Noveishie Tekhnol. – 2006. – 28, № 1. – P. 39–52.
6. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка материалов. – М.: Машиностроение, 1976. – 312 с.
7. Коваленко В. С. Металлографические реактивы. – М.: Металлургия, 1973. – 78 с.
8. Каракозов Э. С. Соединение металлов в твердой фазе. – М.: Металлургия, 1976. – 264 с.
9. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Саенко В. Я. Самопроизвольная очистка металла от оксидных пленок // Докл. АН СССР. – 1980. – 159, № 1. – С. 1117–1118.

Поступила в редакцию 05.05.2014

## Компания «Hypertherm» представила новый резак специального применения

Компания «Hypertherm» представила свои продукты на крупнейшей в мире выставке оборудования для работы с тонколистовым металлом «EuroBLECH2014» (ноябрь 2014 г.). Посетители выставки высоко оценили презентацию резака специального применения для систем HPRXD и демонстрацию работы систем водоструйной резки в реальном времени.

Компания разрабатывает и производит передовые системы плазменной резки, применяющиеся в самых различных отраслях, например, судостроения и ремонте авто-



мобилей. В семейство продуктов компании входят ручные и механизированные системы плазменной и лазерной резки металлов, расходные детали, средства перемещения и регулировки высоты с ЧПУ, а также программное обеспечение резки. Системы производства «Hypertherm» имеют высокую репутацию, что обеспечивает повышение производительности и рентабельности для десятков тысяч предприятий. Репутация компании



в области инноваций плазменной резки ведет свой отсчет с 1968 г., когда в «Hypertherm» была изобретена плазменная резка с впрыском воды. Компания находится в совместном владении более чем 1200 партнеров, имеет дилерскую сеть и ведет операции по всему миру.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЯТНА НАПЫЛЕНИЯ И ФИГУРЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ МИКРОПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ ИЗ ДИОКСИДА ТИТАНА

Ю. С. БОРИСОВ, С. Г. ВОЙНАРОВИЧ, А. Н. КИСЛИЦА, С. Н. КАЛЮЖНЫЙ  
 ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведен анализ накопленного опыта по применению газотермических технологий в производстве электропроводных, диэлектрических и резистивных покрытий для машиностроения, электротехники, приборостроения и других областей промышленности. Показано, что наиболее перспективным для формирования резистивных покрытий при изготовлении нагревательных элементов является способ плазменно-дугового напыления. Установлено, что в процессе изготовления резистивных нагревательных элементов (РНЭ) малых размеров (например, для радиоэлектроники) способом традиционного плазменно-дугового напыления увеличиваются потери напыляемого материала, связанные с геометрическим фактором. В связи с этим, с целью повышения степени использования напыляемых материалов перспективным является применение технологии микроплазменного напыления. Цель работы направлена на исследование формирования пятна напыления и фигуры металлизации в условиях микроплазменного напыления покрытия из диоксида титана. В процессе исследования было установлено, что пятно напыления из порошка  $TiO_2$  имеет форму эллипса с размером осей 6...9,2 мм, где меньшая ось направлена по горизонтали, а большая по вертикали. Соотношение осей составляет 1,01...1,47 и зависит от параметров режима напыления. Определены потери напыляемого материала, связанные с геометрическим фактором, которые составили 53 % при напылении дорожки шириной 1 мм и меньше 1 % при напылении дорожки 5 мм. Библиогр. 19, табл. 1, рис. 5.

*Ключевые слова:* микроплазменное напыление, диоксид титана, резистивный нагревательный элемент, фигура металлизации

На сегодняшний день накоплен большой опыт в изготовлении способами газотермического напыления (ГТН) различного рода покрытий таких, как электропроводные, диэлектрические и резистивные, предназначенных для различных отраслей промышленности (машиностроения, электротехники, приборостроения и др.) [1–3].

Большой практический интерес представляют резистивные покрытия, изготовленные способами ГТН. Анализ литературных источников о проводимых исследованиях по применению способов ГТН для формирования резистивных покрытий в электротехнике неоднократно подтверждает перспективность данных технологий [4, 5]. С развитием и усовершенствованием технологии ГТН в последнее время в производстве резистивных покрытий все более широкое применение находит способ плазменно-дугового напыления [6–9]. В частности, данный способ хорошо себя зарекомендовал при изготовлении резистивных нагревательных элементов (РНЭ) [10–12]. Изготовленные способом плазменно-дугового напыления РНЭ характеризуются существенным уменьшением температуры в токонесущих слоях и увеличенным сроком службы [13–15]. Однако в процессе изготовления РНЭ малых размеров для радиоэлектроники способом традиционного плазменно-ду-

гового напыления возникают дополнительные затраты, вызванные увеличением потерь напыляемого материала, которые характеризуются как потери, связанные с геометрическим фактором. Эти потери обусловлены тем, что диаметр пятна напыления для традиционного плазменно-дугового напыления составляет 20...25 мм, что превышает ширину дорожки (2...5 мм) РНЭ. С целью повышения степени использования напыляемого материала целесообразно применить технологию микроплазменного напыления (МПН) [16, 17]. Данная технология позволит наносить покрытия из разного рода материалов, значительно сократит потери напыляемого материала благодаря небольшому диаметру пятна напыления (3...5 мм), оказывая при этом минимальное термическое влияние на подложку, что позволит получать покрытия на тонкостенных деталях без их коробления.

В работе проведено исследование формирования пятна напыления и фигуры металлизации в условиях микроплазменного нанесения покрытия из диоксида титана, определены потери напыляемого материала, связанные с геометрическим фактором в зависимости от ширины напыляемой дорожки.

Для анализа потерь материала, связанных с геометрическим фактором, был проведен ряд экс-

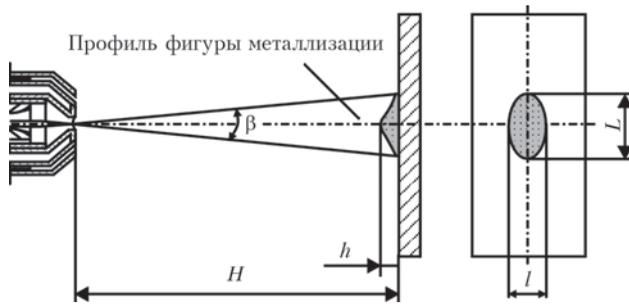


Рис. 1. Схема исследования фигуры металлizations

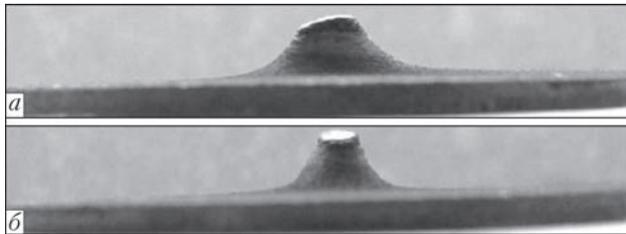


Рис. 2. Профили фигуры металлizations из материала  $TiO_2$ : а — большая ось; б — меньшая

периментов по определению параметров фигуры металлizations, которая описывает распределение массы материала покрытия в пятне напыления. Фигуры металлizations получали в процессе напыления при неподвижном плазмотроне в точку на плоские образцы размером 20 мм в течение 10 с, а затем проводили измерения вертикальной (большой)  $L$  и горизонтальной (малой)  $l$  осей пятна напыления, а также максимальной высоты напыленной горки  $h$  (рис. 1).

При помощи цифрового фотоаппарата проводили макросъемку профилей фигуры металлizations в направлениях, перпендикулярных ее осям (рис. 2).

После этого была проведена обработка изображения по определению координат профиля фигуры. По этим координатам с помощью программы MathCad строилась фигура металлizations и определялась описывающая ее функция, по которой рассчитывалась площадь фигуры для большей и меньшей осей. Имея данные о размерах фигуры

Параметры фигуры металлizations в зависимости от режимов напыления  $TiO_2$

№ режима	$I, A$	$G_{пл}, л/мин$	$H, мм$	$P_{расх. пор}, г/мин$	Высота фигуры металлizations, мм	Большая ось, мм	Меньшая ось, мм
1	45	120	200	1,8	2,21	9,2	7,5
2	45	120	100	0,6	1,04	6,3	4,7
3	45	60	200	0,6	0,53	8,2	7,4
4	45	60	100	1,8	2,31	7,2	5,6
5	35	20	200	0,6	0,35	8,8	6,2
6	35	120	100	1,8	2,27	8,6	6,6
7	35	60	200	1,8	0,81	7,2	7
8	35	60	100	0,6	1,34	7,6	5,4

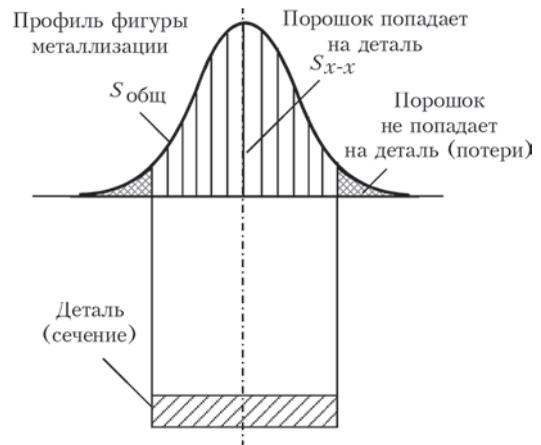


Рис. 3. Потери материала из-за геометрического фактора металлizations, можно определить такой параметр, как угол раскрытия плазменной струи:

$$\beta = 0,5 \arctg \frac{L}{2H}, \quad (1)$$

где  $L$  — ширина валика;  $H$  — дистанция напыления.

Потери материала, связанные с геометрическим фактором, определялись как:

$$П_{г.ф} = (1 - S_{x-x}/S_{общ})100, \%, \quad (2)$$

где  $S_{общ}$  — общая площадь фигуры металлizations (рис. 3);  $S_{x-x}$  — площадь фигуры металлizations, ограниченная размером детали.

Напыление проводили на установке микроплазменного напыления МПН-004. В качестве материала для напыления был использован порошок диоксида титана ( $TiO_2$ ) фирмы «Metachim» с размером частиц порошка 15...40 мкм.

Интервалы варьирования, значения исследуемых режимных параметров и результаты эксперимента по измерению геометрических размеров пятна напыления приведены в таблице.

В процессе исследования было установлено, что пятно напыления из порошка  $TiO_2$  имеет форму эллипса с размером осей 6...9,2 мм, где меньшая ось направлена по горизонтали, а большая по вертикали. Соотношение осей составляет 1,01...1,47 и зависит от параметров режима напыления. Вероятно, такая форма пятна напыления вызвана тем, что при подаче порошка с использованием дозатора МД-004 на его частицы действует сила тяжести, направленная перпендикулярно оси струи. Так как частицы порошка отличаются размером, следовательно, массой и аэродинамическим сопротивлением, под воздействием силы тяжести они будут проникать в струю на разную глубину. При таких условиях получаемое пятно напыления будет иметь форму эллипса, большая ось которого расположена в вертикальной плоскости, т. е. совпадает с

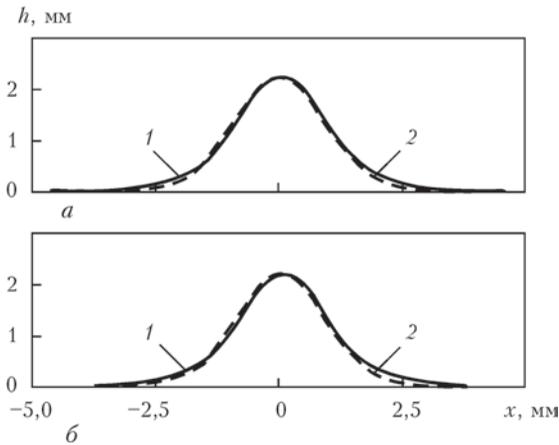


Рис. 4. Поперечное сечение фигур металлизации по осям пятна напыления: *a* — сечение по большей оси  $y = 2,21 \cdot e^{-0,56x^2}$ ; *б* — сечение по меньшей оси  $y = 2,21 \cdot e^{-0,6x^2}$ ; 1 — график распределения Гаусса (расчетный); 2 — фактический профиль фигуры металлизации направлением действия силы тяжести (см. рис. 1). Анализ характера кривых показал, что геометрия фигуры металлизации при МПН достаточно надежно описывается функцией Гаусса [18]

$$y = y_0 e^{-kx^2}, \quad (3)$$

где  $y_0$  — толщина покрытия на оси валика;  $x$  — расстояние от оси валика;  $k$  — коэффициент сосредоточенности материала покрытия в пятне напыления.

С использованием экспериментальных данных, полученных в результате измерения профиля фигур металлизации (измерения проводили по большей  $L$  и меньшей  $l$  осям — см. рис. 1), были построены совпадающие с ними кривые Гаусса для различных режимов напыления (рис. 4). Коэффициент корреляции  $K$  составил 0,9849... 0,9992. Значение  $k$  изменялось в диапазоне 0,12...0,97.

В результате проведенных расчетов согласно формуле (1) установлено, что угол раскрытия микроплазменной струи находится в пределах 2...5,2°. Полученные результаты соответствуют значениям, приводимым в литературе для ламинарных плазменных струй [19].

Проведенные для каждого опыта расчеты потерь напыляемого материала, связанные с геометрическим фактором, в зависимости от размера резистивной дорожки, приведены в виде гистограммы (рис. 5).

Анализ гистограммы позволил установить, что наименьшие потери обеспечиваются при использовании режима № 6 (см. таблицу). Данный режим характеризуется минимальным значением силы тока и высоким расходом плазмообразующего газа, что снижает температуру плазменной струи и тем самым позволяет сократить дистанцию напыления до подложки без риска ее пере-

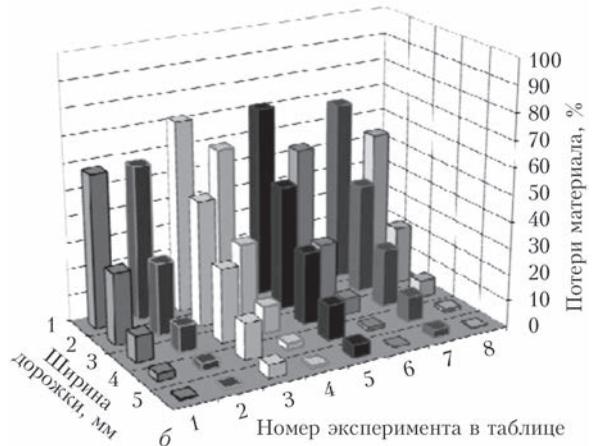
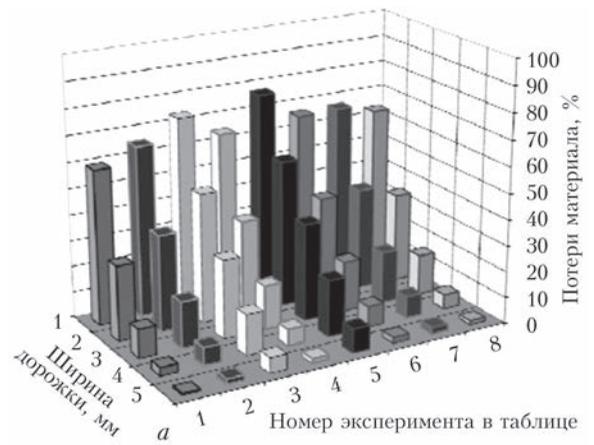


Рис. 5. Потери напыляемого материала, связанные с геометрическим фактором, в зависимости от размера резистивной дорожки: *a* — для большей диагонали; *б* — для меньшей диагонали

грева. Сокращение дистанции в свою очередь приводит к уменьшению пятна напыления. Потери при этом составили 53 % при напылении дорожки шириной 1 мм и меньше 1 % при напылении дорожки 5 мм.

### Выводы

1. В результате исследования процесса формирования покрытия из диоксида титана в условиях микроплазменного напыления установлено, что геометрические размеры пятна напыления зависят от параметров процесса напыления. Пятно напыления имеет форму эллипса с размером осей 6...9,2 мм при соотношении осей 1,01...1,47, а фигура металлизации описывается распределением Гаусса.

2. Показано, что подбором режимов микроплазменного напыления резистивных дорожек из материала  $TiO_2$  возможно управлять потерями материала, связанными с геометрическим фактором. Минимальные потери достигаются при условии работы плазмотрона на режиме № 6, который характеризуется минимальным значением силы тока и высоким расходом плазмообразующего газа, что снижает температуру плазменной струи и тем са-



мим позволяет сократить дистанцию напыления до подложки без риска ее перегрева с уменьшенным пятном напыления. Это позволяет получать минимальные потери напыляемого материала дорожки шириной от 1 до 5 мм, которые составляют 53 % при напылении дорожки шириной в 1 мм и меньше 1 % при напылении дорожки шириной в 5 мм.

1. *Вашкевич Ф. Ф., Спальник А. Я., Плужко И. А.* Электротермоизоляция индукторов для внутреннего нагрева трубных заготовок // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск, ПАСА, 2009. – С. 4–6.
2. *Борисов Ю. С., Кислица А. Н.* Микроплазменное напыление с использованием проволочных материалов // Автомат. сварка. – 2002. – № 3. – С. 54–55.
3. *Коваленко Г. Д., Зомбжицкий А. П.* Особенности плазменного напыления электронагревательных покрытий с диэлектрическим наполнителем // Физика и химия обработки материалов. – 1980. – № 4. – С. 86–89.
4. *Лясников В. Н., Перов В. В., Лаврова В. Н.* Применение плазменно-дугового напыления алунда при изготовлении катодно-подогревательного узла // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1977. – Вып. 4. – С. 85–87.
5. *Пат. 2066514 РФ МКИ Н 05 В 3/12.* Способ изготовления резистивного нагревательного элемента / Д. И. Бакианов, И. Н. Беляйков, А. М. Вирник и др. – Опубл. 10.09.96.
6. *Scheitz S., Toma L., Berger L.-M. et al.* Thermisch gespritzte keramische Schichtheizelemente // Thermal spray bulletin. – 2011. – 4. – S. 88–92.
7. *Лясников В. К., Богатырев Г. Ф.* Плазменное напыление порошковых материалов на детали электронных приборов // Обзор по электронной технике. Сер. Технология, организация производства и оборудование. – М.: ЦНИИ «Электроника». – 1978. – Вып. 4. – С. 62.
8. *Robson G. J.* Applications of plasma spraying in Hard facing // Public session and metals technology conf., Sydney. – 1976. – P. 6.5.1–6.5.12.
9. *Хасуй А.* Техника напыления: Пер. с япон. / Под ред. С. Л. Масленикова. – М.: Машиностроение, 1975. – 228 с.
10. *Достанко А. П., Витязь П. А.* Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. – Минск: ФУ АИНФОРМ, 2001. – Т. 3. – 244 с.
11. *Барановский Н. Д., Шаронов Е. А., Ванновский В. В.* Электрические свойства плазменных покрытий для плоских нагревательных элементов // Матер. конф. «Газотермическое напыление в промышленности СССР и за рубежом». – Ленинград, 27–29 мая 1991 г. – Л.: ЛД НТП, 1991. – С. 60–61.
12. *Гриффен Л. А., Дядечко А. Г. и др.* Нагревательные элементы для арматуры, получаемые способом газотермического напыления порошков // Порошк. металлургия. – 1990. – № 5. – С. 102–104.
13. *Плазменное нанесение резистивных слоев ленточного электронагревателя / А. А. Еришов, Э. К. Урбах, В. А. Фалеев, В. С. Чередниченко // Физика низкотемпературной плазмы: Материалы конф. – Петрозаводск: ПГУ, 1995. – Ч. 3. – С. 409–411.*
14. *Аньшаков А. С., Казанов А. М., Урбах Э. К.* Создание низкотемпературного нагревателя способом плазменного напыления // Физика и химия обработки материалов. – 1998. – № 3. – С. 56–61.
15. *Smyth R. T.* Thermal spraying of fine powders // Proc. of 7th Inter. Metal Spray. Conf., London, 1973. – P. 89–95.
16. *Нанесение узкополосных покрытий способом микроплазменного напыления / Ю. С. Борисов, Ю. Н. Переверзев, В. Г. Бобрик, С. Г. Войнарович // Автомат. сварка. – 1999. – № 6. – С. 53–55.*
17. *Кислица А. Н., Кузьмич-Янчук Е. К., Кислица Н. Ю.* Получение узких дорожек способом микроплазменного напыления из NiCr-проволоки // Сб. тез. Всеукр. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов «Сварка и смежные технологии». – Киев, 27–29 мая, 2009 г. – С. 94.
18. *Войнарович С. Г.* Исследование формы и размера пятна напыления и фигуры металлизации в условиях микроплазменного напыления покрытия из гидроксипатита // Вест. НУК. – 2012. – № 3. – С. 81–84.
19. *Анциферов В. Н., Бобров Г. В., Дружинин Л. К.* Порошковая металлургия и напыления покрытия / Под ред. Б. С. Митина. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.

Поступила в редакцию 21.10.2014



**СВАРКА  
И РЕЗКА**  
15-я международная специализированная выставка

**7.04 – 10.04 2015 г.**

Место проведения: Беларусь, Минск,  
проспект Победителей, 20/2  
Организатор: ЗАО «МинскЭкспо»

### Направления экспозиций

- ▶ Материалы для сварки, наплавки и пайки
- ▶ Оборудование и технологии сварки, резки, наплавки, пайки и термообработки
- ▶ Источники питания и системы управления сварочным оборудованием
- ▶ Оборудование для орбитальной сварки и обработки труб
- ▶ Электронно-лучевая, лазерная, плазменная сварка и резка
- ▶ Автоматизированные комплексные системы и агрегаты для сварки и резки
- ▶ Автоматизация сварочных производственных и технологических процессов, программное обеспечение
- ▶ Приборы для неразрушающего контроля сварных соединений
- ▶ Научное и информационное обеспечение сварки
- ▶ Система подготовки, переподготовки и аттестации сварщиков
- ▶ Охрана труда и экологическая безопасность в сварочном производстве
- ▶ Сертификация сварочного оборудования.

Выставка проводится одновременно с международными специализированными выставками «Металлообработка», «Порошковая металлургия» и международным специализированным салоном «Защита от коррозии. Покрытия». Руководитель проекта: Федорова Елена Владимировна, тел.: +375 17 226 98 58, 226 90 83 факс: +375 17 226 98 58, 226 99 36; e-mail: e\_fedorova@solo.by



УДК 621.793.7

## КЕРМЕТНЫЕ ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ «КАРБИД ХРОМА–НИХРОМ», ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ СВЕРХЗВУКОВОГО ВОЗДУШНО-ГАЗОВОГО ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

**В. Н. КОРЖИК, А. Л. БОРИСОВА, В. В. ПОПОВ, М. В. КОЛОМЫЦЕВ, А. А. ЧАЙКА,  
В. И. ТКАЧУК, Н. В. ВИГИЛЯНСКАЯ**

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Известно, что применение сверхзвуковых методов газотермического нанесения покрытий приводит к существенному повышению служебных свойств изделий. Однако до настоящего времени не делалось попыток получения карбидных или керметных покрытий с помощью сверхзвуковых методов плазменного напыления. Настоящая работа посвящена получению керметных покрытий из композиций «карбид хрома–нихром» методом сверхзвукового воздушно-газового плазменного напыления (СВГПН). Технология СВГПН имеет ряд преимуществ по сравнению с известной технологией сверхзвукового газопламенного напыления (HVOF). В первую очередь это касается производительности, экономичности и характеристик (температура, скорость) газовой струи. Исследована структура и фазовый состав полученных покрытий. Показано, что при напылении с использованием сверхзвуковых газовых струй в покрытиях в результате окисления и образования оксидов возрастает содержание карбида  $Cr_7C_3$  и снижается содержание NiCr. Покрытие из композиционного порошка отличается более высокой степенью плотности и однородности, имеет слоистую тонкоамелярную структуру с включениями мелкодисперсных карбидов, содержит меньшее количество оксидной фазы, но большее количество карбида хрома  $Cr_3C_2$  по сравнению с покрытием из механической смеси  $Cr_3C_2 + NiCr$ . Покрытия могут быть рекомендованы к применению в качестве износостойких при повышенных температурах. Библиогр. 6, табл. 6, рис. 7.

*Ключевые слова:* сверхзвуковое воздушно-газовое плазменное напыление, керметные покрытия, карбид хрома, порошки, микроструктура, фазовый состав, микротвердость

Плазменные покрытия на основе карбидов хрома характеризуются сочетанием таких свойств как стойкость к изнашиванию при высоких температурах (540...840 °С) абразивными частицами и твердыми поверхностями, высокой стойкостью в условиях фреттинг-коррозии и в агрессивных средах (например, в среде жидкого натрия при 200...625 °С), термостойкостью при температурах до 980 °С, устойчивостью к радиации [1].

Для нанесения керметных покрытий с карбидами хрома обычно применяют механические смеси  $Cr_3C_2$  (реже его смесь с  $Cr_7C_3$  или карбид  $Cr_{23}C_6$ ) с такими металлами как Ni, Co, Ni+Cr, NiCr при различном сочетании содержания компонентов (количество металлической связки может изменяться от 6...8 до 45 мас.%).

Основные методы, которые применяют для нанесения покрытий с карбидами хрома, – это плаз-

менное, детонационное и сверхзвуковое газопламенное напыление [1–3].

Известно, что применение сверхзвуковых методов газотермического нанесения покрытий приводит к существенному повышению их служебных свойств. Однако до настоящего времени не делалось попыток получения карбидных или керметных покрытий с помощью сверхзвуковых методов плазменного напыления.

Настоящая работа посвящена получению керметных покрытий из композиций «карбид хрома–нихром» методом сверхзвукового воздушно-газового плазменного напыления (СВГПН), исследованию структуры и фазового состава полученных покрытий.

Технология СВГПН имеет ряд преимуществ по сравнению с известной технологией сверхзвукового газопламенного напыления (HVOF). В первую

**Таблица 1. Сравнительные характеристики HVOF и СВГПН технологий**

Наименование технологии	Расход газа, м <sup>3</sup> /ч				Расход порошка, кг/ч		Коэффициент использования материала, %	Характеристики струи	
	Пропан	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Воздух	Металлические сплавы	Оксиды		Скорость, м/с	Температура, °С
HVOF	3...4	15...21	1	-	до 23	-	40...75	1400...2700	2800
СВГПН	0,3...40	-	-	10...40	до 50	до 20	60...80	3000	3200...6300

© В. Н. Коржик, А. Л. Борисова, В. В. Попов, М. В. Коломыцев, А. А. Чайка, В. И. Ткачук, Н. В. Вигилянская, 2014



Таблица 2. Химический состав порошков

Марка порошка	Содержание элементов, мас. %						
	Cr	Ni	C	Mn	Fe	Si	Остальное
PP-53	71,10	17,10	9,49	0,036	1,75	0,065	0,41
PP-53B	Основа	20	9,40	Не указан			

очередь это касается производительности, экономичности (стоимость газов) и характеристик (температура, скорость) газовой струи (табл. 1).

В настоящей работе нанесение покрытий осуществляли на установке «Киев-С», разработанной Институтом газа НАН Украины и ИЭС им. Е. О. Патона. В качестве плазмообразующего газа использовали смесь воздуха с добавкой пропана (около 4 об. %) при следующих технологических параметрах:  $I = 260$  А,  $U = 360$  В, дистанция 180 мм, давление воздуха 4 атм, расход 20 м<sup>3</sup>/ч.

В качестве материалов для нанесения покрытий были использованы порошки фирмы «Bay State Surface Technologies, Inc.» (США) двух типов: PP-53 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>25(Ni20Cr) и PP53B Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>(Ni20Cr) (табл. 2).

Для нанесения покрытий применяли порошки с размером частиц 15...44 мкм.

В результате исследования исходных порошков было установлено, что они отличаются по внешнему виду, микроструктуре, микротвердости и фазовому составу. Так, порошок PP-53 состоит из частиц осколочной формы (рис. 1, а, в) и является механической смесью карбидных и металлических частиц, которые резко отличаются по микротвердости (13300±1500 и 1980±600 МПа, соответственно).

Порошок PP-53B состоит из частиц сферической формы (рис. 1, б, г) и, судя по структуре и микротвердости, каждая частица содержит как металлическую, так и карбидную фазы (микротвердость частиц изменяется в диапазоне 5000...10500 МПа).

Исследование химического состава частиц порошков методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) (табл. 3) показало, что в порошке PP-53 практически не содержатся никель либо углерод. Судя по количеству углерода в карбидных частицах (19...21 мас. %) они по составу

Таблица 3. Химический состав частиц исходных порошков по результатам РСМА

Частица порошка	Содержание элементов, мас. %				
	Cr	Ni	C	O*	Примеси
Карбидная (1 на рис. 1, а, в)	70,10...79,70	1,5...5,6	18,9...21,0	-	Fe – 0,73
Металлическая (2 на рис. 1, а, в)	52,0...71,10	24,23...24,39	-	-	W – 0,71; Fe – 1,45
Керметная (3 на рис. 1, б, г)	30,77...68,1	10,55...49,81	9,17...13,6	6,2...7,7	Mg – 0,48...1,24; Al – 0,6; Fe – 0,55; W – 1,13...1,45

\* Обнаружен в отдельных частицах.

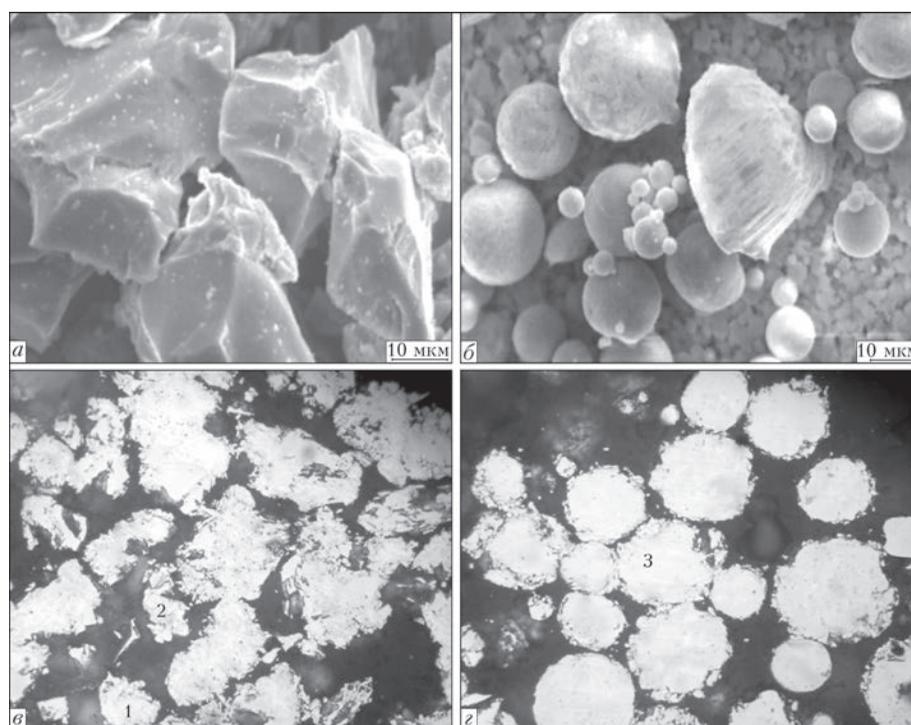


Рис. 1. Внешний вид (а, б) и микроструктура (×800) частиц (в, г) порошков PP-53 (а, в) и PP-53B (б, г): 1 — карбидная; 2 — металлическая; 3 — керметная частицы

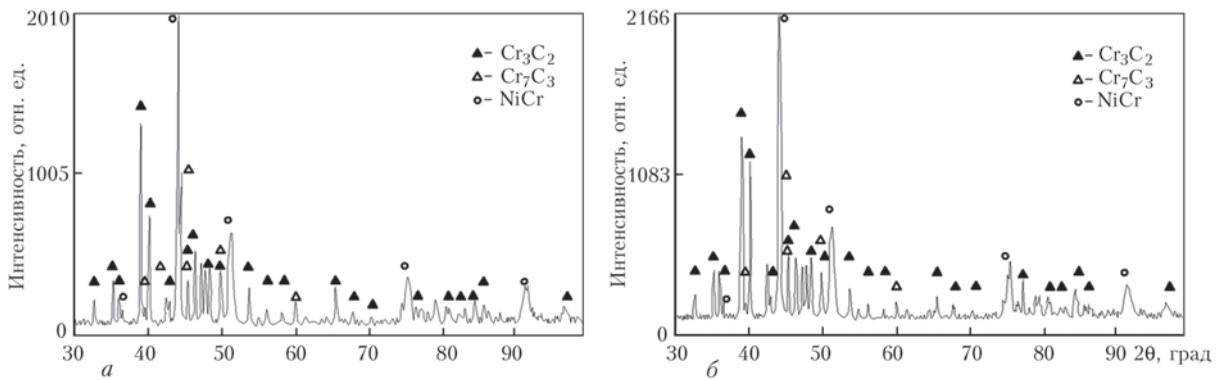


Рис. 2. Рентгенограммы частиц порошков  $Cr_3C_2$ -NiCr: а — PP-53, б — PP-53В

близки к карбиду  $Cr_3C_2$  (19,34 мас. %). Вместе с тем методом рентгеноструктурного фазового анализа (РСФА) в порошке обнаружен и карбид  $Cr_7C_3$  (9,01 мас. % C) (рис. 2, а).

Частицы порошка PP-53В содержат все три элемента (Cr, Ni и C), а также примеси таких элементов как Mg, Al, W, Fe и Ca в небольших количествах (табл. 3). Некоторые частицы имеют области, обогащенные кислородом на уровне 6...7 мас. %.

Вместе с тем результаты РСФА частиц PP-53В свидетельствуют о том, что по качественному составу они не отличаются от порошка PP-53 (рис. 2, б), а поскольку каждая частица содержит

как металлическую, так и карбидную фазы, порошок можно рассматривать как композиционный, состоящий из керметных частиц.

Металлографическое исследование напыленных покрытий не выявило принципиальных отличий в их структуре в зависимости от типа порошка (рис. 3). Можно лишь отметить более высокую степень однородности покрытий из композиционного порошка (PP-53В) по сравнению с покрытиями из механической смеси (PP-53). Вместе с тем наблюдается некоторое отличие в величинах средней микротвердости покрытий и характере вариационных кривых микротвердости (табл. 4, рис. 4).

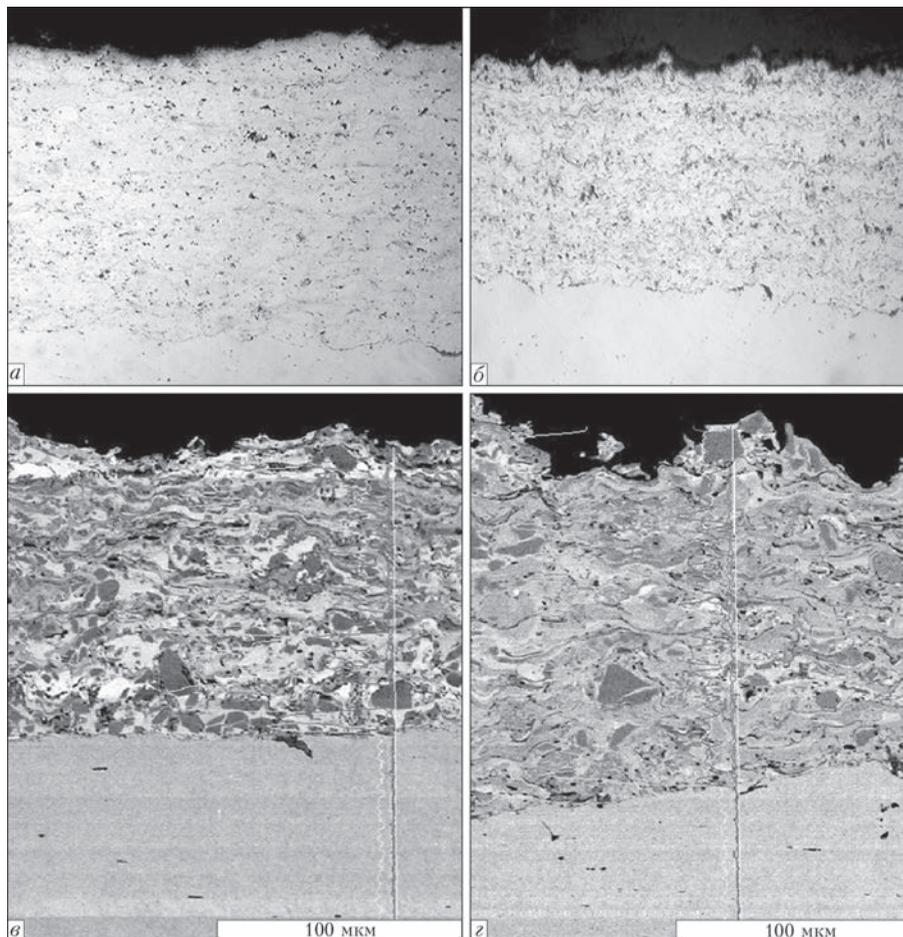


Рис. 3. Микроструктура покрытий из порошков PP-53 (а, в) и PP-53В (б, г) (а, б — микроскоп Неофот,  $\times 400$ ; в, г — электронно-зондовый анализ CamScan)



Таблица 4. Характеристика напыленных покрытий

Марка порошка	Микротвердость, МПа		Фазовый состав, мас. %
	Средняя	Наиболее вероятная	
PP-53	8420±1550	9000; 11500	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> – 26, Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> – 11 NiCr – 48, NiCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> – 15
PP-53B	9960±1400	10500	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> – 21, Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> – 15 NiCr – 53, NiCrO <sub>3</sub> – 11

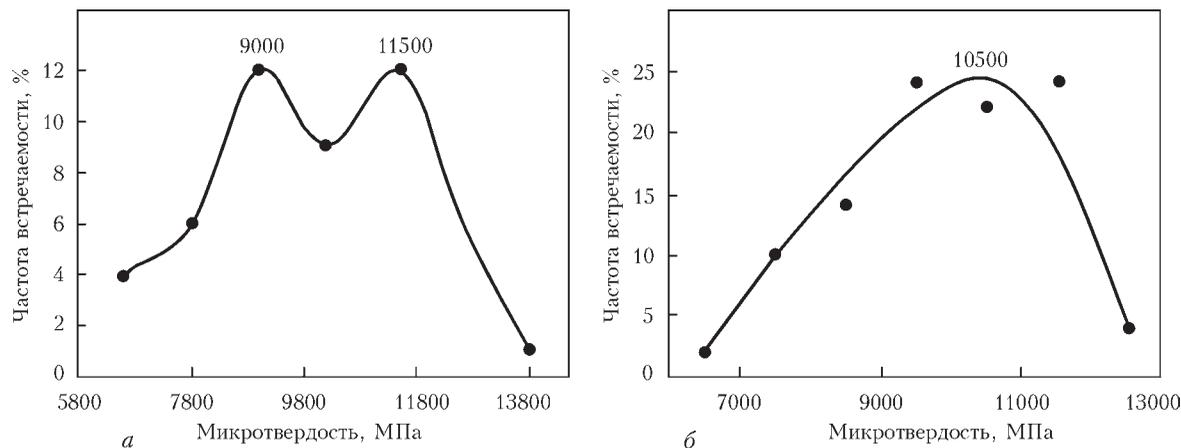


Рис. 4. Вариационные кривые микротвердости плазменных покрытий из порошков PP-53 (а) и PP-53В (б)

Так, на вариационной кривой микротвердости покрытия, полученного из порошка PP-53 (механическая смесь Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> и NiCr), можно отметить два наиболее вероятных значения микротвердости, что может свидетельствовать о наличии в структуре, как и в исходном порошке, участков, содержащих более твердые карбидные фазы (*HV* — 11500 МПа) и участки, обогащенные металлом (*HV* — 9000 МПа). Вариационная кривая микротвердости покрытия из композиционного порошка PP-53В имеет лишь одно наиболее вероятное значение микротвердости 10500 МПа, среднее между двумя отмеченными выше.

Исследование фазового состава напыленных покрытий методом РСФА показало (рис. 5), что они содержат карбид хрома Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, нихром (Ni80Cr20) и оксиды NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (для покрытия из механической смеси) или NiCrO<sub>3</sub> (для покрытия из композиционного порошка), последние не были обнаружены в исходных порошках. Наличие указанных фаз в напыленных покрытиях подтверждают и результаты локального анализа методом РСМА (табл. 5) отдельных структурных элементов напыленных покрытий (рис. 6).

Если сравнить интенсивность рентгеновских отражений отдельных фаз в исходных порошках (рис. 2) и в напыленных покрытиях (рис. 5) можно отметить, что в результате напыления в покрытиях возрастает содержание карбида Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> по сравнению с Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> и снижается содержание NiCr в результате окисления и образования оксидов. Рентгеноспектральный микроанализ напыленных покрытий (рис. 7, табл. 6) показал, что усредненный химический состав (спектр 3) и состав отдельных зон по глубине (спектры 4–6) несколько отличаются от значений для исходного порошка (табл. 1). Это происходит в результате появления в покрытиях оксидных фаз. При этом в случае покрытия из порошка PP-53В количество кислорода несколько увеличивается по направлению от границы раздела с основой к внешней поверхности покрытия, в то же время содержание углерода, наоборот, снижается. Аналогичная закономерность наблюдается и для покрытия из порошка PP-53. Это связано с повышением температуры напыляемой поверхности по мере наращивания слоя покрытия. Сравнивая характеристики напыленных покрытий из порошков PP-53 и PP-53В можно от-

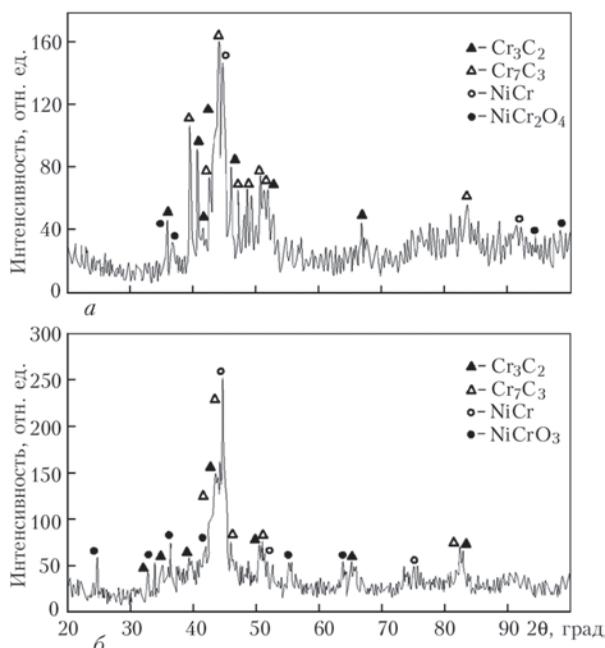


Рис. 5. Рентгенограммы напыленных покрытий: а — покрытие из порошка PP-53; б — PP-53В



**Таблица 5.** Содержание элементов, определенное методом РСМА, в структурных участках покрытий из порошка PP-53 (а) и PP-53В (б) (рис. 6)

Анализируемый спектр	Содержание элементов, мас. %					Предполагаемая фаза
	Cr	Ni	C	O	Fe	
1 (а)	13,33	81,57	-	-	4,3	NiCr
2 (а)	81,82	1,45	16,72	-	-	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>
3 (а)	89,4	-	10,60	-	-	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>
4 (а)	56,41	18,5	4,87	20,22	-	Оксид
1 (б)	61,13	25,89	11,66	-	-	Участки керметов (металл+карбид)
2 (б)	13,99	75,11	8,71	-	0,93	
3 (б)	26,5	61,97	8,89	-	0,79	
4 (б)	28,93	59,57	-	9,44	0,49	Оксид

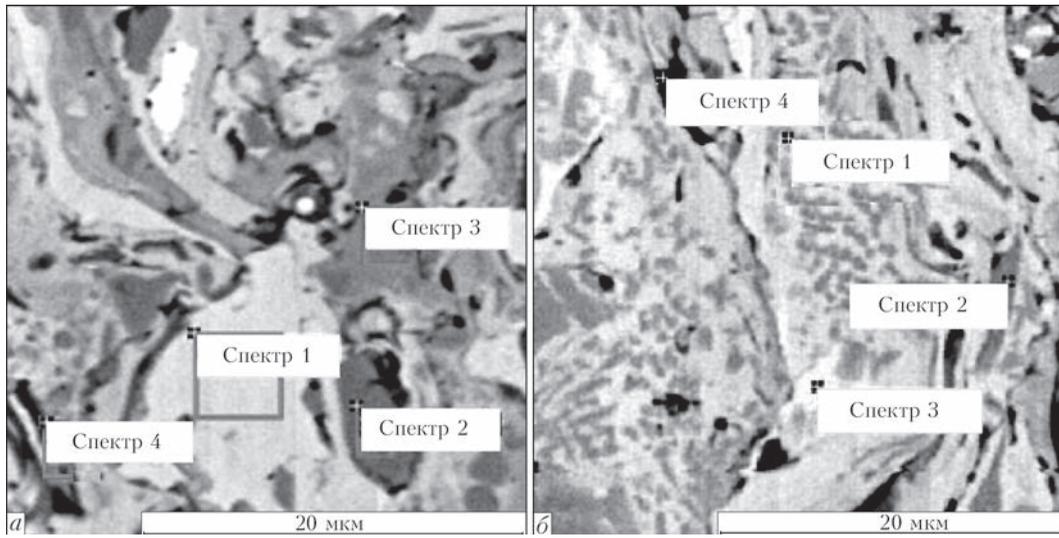


Рис. 6. Участки покрытий из порошков PP-53 (а) и PP-53В (б), исследованные методом РСМА

метить, что покрытие из композиционного порошка отличается более высокой степенью плотности и однородности, имеет слоистую тонколамелярную структуру с включениями мелкодисперсных карбидов, содержит меньшее количество оксидной фазы, но большее количество карбида хрома Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> по сравнению с покрытием из механической смеси Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> + NiCr.

Известно, что тугоплавкость, стабильность и твердость карбидов хрома снижается с уменьшением в них количества углерода [4, 5], поэтому потери углерода в процессе газотермического напыления керметных покрытий на основе карбида хрома нежелательны. В обзорной статье [6] о влиянии методов газотермического напыления (HVOF, плазменное напыление в открытой атмосфере (APS), плазменное напыление в динамическом вакууме (VPS) и детонационное напыление) на свойства покрытий из механической смеси Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> + NiCr отмечается, что от потерь углерода при напылении зависит твердость, абразивная износостойкость и термостойкость покрытий. Так, например, VPS покрытия имеют более высокую твердость и абразивную износостойкость, но меньшую термостойкость среди остальных, а APS покрытия с аргоно-гелиевым плазмообразующим газом превосходят

по своим свойствам покрытия с использованием аргоно-водородной смеси и т. д.

**Таблица 6.** Результаты РСМА напыленного покрытия из порошка PP-53В (рис. 7)

Анализируемый спектр	Химический состав, мас.%					
	C	O	Cr	Fe	Ni	W
2	1,91	-	-	97,66	-	-
3	9,1	6,1	52,61	2,62	29,58	-
4	9,72	5,32	49,8	3,93	30,39	0,83
5	8,56	6,55	55,21	2,23	26,75	0,68
6	8,38	7,15	55,76	2,59	25,38	0,73

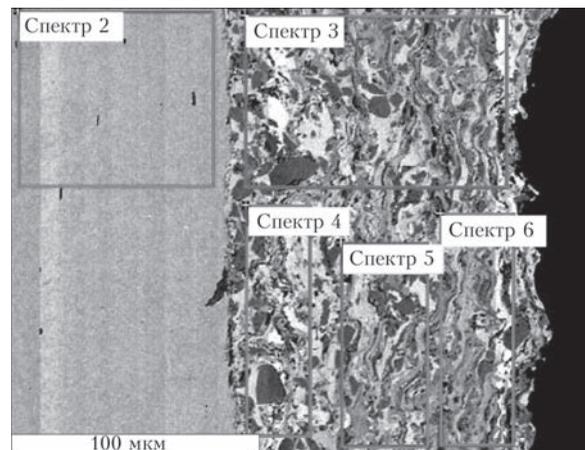


Рис. 7. Покрытие из порошка PP-53В, исследованное методом РСМА



Результаты настоящей работы позволяют сделать заключение о том, что повышение качества покрытия из композиции  $\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{NiCr}$  возможно также при использовании вместо механической смеси композиционного порошка того же состава.

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардаговская. – Киев: Наук. думка, 1987. – 544 с.
2. Guilemagy M., Nutting I., Llorca-Isern N. Microstructural examination of HVOF chromium carbide coatings for high-

temperature applications // J. of thermal spray technology. – 1996. – V. 5(4). – P. 483–489.

3. Comparative study of  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr coating / J. M. Guilemagy, N. Espallargas, P. H. Suegama, A. V. Benedetti // Corrosion science. – 2006. – 48. – P. 2998–3013.
4. Киффер Р., Бенезовский Ф. Твердые материалы / Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1968. – 384 с.
5. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений. Справочное изд. / Под ред. Т. Я. Косолаповой. – М.: Металлургия, 1986. – 928 с.
6. Takenchi J., Nakahira-Kobe A., Takara G. Barbezat-Wohlen Plasma-Technik.  $\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{NiCr}$  cermet coatings: Proc. of TS'93. – Aachen, 1993 – P. 1–14.

Поступила в редакцию 17.09.2014



### Новинки сварочного оборудования и материалов от ведущих производителей на Weldex/Россварка 2014

С 7 по 10 октября 2014 г. в Москве в КВЦ «Сокольники» состоялась 14-я Международная выставка сварочных материалов, оборудования и технологий Weldex/Россварка. Организатором этого мероприятия выступила Группа компаний ITE, лидер рынка выставочных услуг в России. Выставка состоялась при поддержке Российского научно-технического сварочного общества и Московского Межотраслевого Альянса Главных сварщиков.

В рамках Weldex/Россварка 2014, крупнейшей выставки в области сварочных материалов, оборудования и технологий в России, специалисты имели возможность ознакомиться с современными технологическими решениями и новинками в области сварки и родственных процессов, в том числе новейшими сварочными аппаратами, робототехникой, средствами индивидуальной защиты, вентиляционным и фильтровентиляционным оборудованием, системами контроля качества сварных соединений и многим другим.

Участниками выставки стали 232 компании из 18 стран мира, среди них ведущие компании отрасли: «Lincoln Electric», «Вебер Комеханикс», «Kemppi», «KUKA Robotics», «НТО ИРЭ-Полюс», «FANUC Robotics», «Евролюкс». Впервые на выставке свою продукцию продемонстрировали более 40 компаний, включая DWT International AG, IGM, Schlatter Industries AG, «БЧС Групп.Ру», «ПТК», «Лига Сварки», «Новооскольский электродный завод», Промышленная группа Staubli, ЭПФ «Судотехнология».

На стенде компании ЭСАБ специалисты могли ознакомиться с инновационным сварочным источником Aristo@Mig 4004 Pulse, автоматическим и роботизированным оборудованием для сварки A2 Multitrac, Railtrac 1000, Miggytrac 1001, а также новым ассортиментом средств индивидуальной защиты сварщика и окружающей среды.

Новую серию промышленных сварочных аппаратов FastMig для производства металлоконструкций продемонстрировала компания «Kemppi». На стенде компании «Евролюкс» вниманию посетителей была представлена приточно-вытяжная фильтровальная система радиального типа Clean Air Tower.

Компания-разработчик «МАГНИТ» презентовала на выставке новую модификацию установки для низкочастотной виброобработки металлоконструкций ВТУ01МП.02. Впервые в рамках Weldex/Россварка состоялись мастер-классы по проведению различных видов сварочных работ среди участников выставки.

## ЛИНЕЙНАЯ СВАРКА ТРЕНИЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ (Обзор)

И. В. ЗЯХОР, М. С. ЗАВЕРТАННЫЙ, С. В. ЧЕРНОБАЙ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены возможности и перспективы применения линейной сварки трением для соединения различных металлических материалов: сталей, титановых сплавов, жаропрочных никелевых сплавов, композиционных материалов. Приведены параметры режима линейной сварки трением для различных сочетаний материалов и их механические свойства. Структура соединений при линейной сварке трением аналогична таковой для других разновидностей сварки трением. Ширина характерных участков соединения (зоны динамической рекристаллизации, термомеханического и термического воздействия) зависит от параметров режима – времени сварки, осевого усилия, амплитуды и частоты колебаний. Проанализированы современные тенденции в моделировании тепловыделения и деформации при линейной сварке трением. Актуальной проблемой остается снижение стоимости и повышение надежности оборудования для реализации этого процесса. В настоящее время область промышленного применения данного способа ограничивается предприятиями аэрокосмической промышленности, где соединяют компоненты газотурбинных двигателей из титановых сплавов, а в перспективе возможно использование жаропрочных никелевых сплавов и композиционных материалов. Библиогр. 35, рис. 5.

*Ключевые слова:* линейная сварка трением, стадии процесса, структура соединений, моделирование, титановые сплавы, жаропрочные никелевые сплавы, композиционные материалы

За почти 60-летний период исследовательских работ и промышленного использования сварки трением (СТ) в мире накоплен большой объем информации по соединению различных конструкционных материалов. Предложено и реализовано на практике около 20 разновидностей технологических процессов, использующих нагрев трением для получения неразъемных соединений, наплавки, формовки, заваривания отверстий, получения заклепочных соединений [1]. Наибольшее распространение в различных отраслях промышленности получила СТ вращением, изобретение которой датируется 1956 г.

Практически одновременно с началом промышленного применения СТ был описан способ сварки вибротрением, использующий относительное возвратно-поступательное перемещение для наплавки и соединения деталей с прямоугольным поперечным сечением [2, 3]. В 1969 г. запатентован механизм возвратно-поступательного движения для сварки низкоуглеродистой стали [4].

Способ сварки вибротрением, позднее получивший название линейной сварки трением (ЛСТ), широко использовался для соединения изделий из термопластов [5], в то же время его применение для сварки металлических материалов сдерживалось сложностью и значительной стоимостью создания надежного оборудования. В конце 1980-х годов потребность ведущих предприятий аэрокосмической промышленности обусловила актуальность разработки технологий и оборудова-

ния для ЛСТ различных сплавов применительно к созданию сварных роторов авиационных газотурбинных двигателей (ГТД).

В 1990 г. в Британском институте сварки была введена в эксплуатацию первая специализированная машина с электромеханическим приводом для ЛСТ металлов. Успешная сварка образцов прямоугольного сечения 25×6 мм из углеродистой и нержавеющей аустенитной сталей, алюминиевого сплава 5154, титанового сплава Ti-6Al-4V [6–8] послужила исходной точкой для активной заинтересованности в технологии ЛСТ таких компаний, как «Rolls Royce», «MTU Aero Engines» и «Pratt & Whitney». Объединенными усилиями группы из восьми европейских компаний была разработана и воплощена концепция LinFric® оборудования для ЛСТ, базирующаяся на использовании высокоточных гидравлических силовых приводов с компьютеризированным управлением. С этого времени в ведущих исследовательских центрах и предприятиях различных стран начались интенсивные работы по созданию оборудования, изучению процесса ЛСТ и его промышленному применению.

Целью настоящего обзора является анализ технологических возможностей и особенностей формирования соединений металлических материалов при линейной сварке трением.

**Общая характеристика процесса ЛСТ.** Схема процесса ЛСТ представлена на рис. 1, диаграмма изменения параметров режима во времени — на рис. 2.

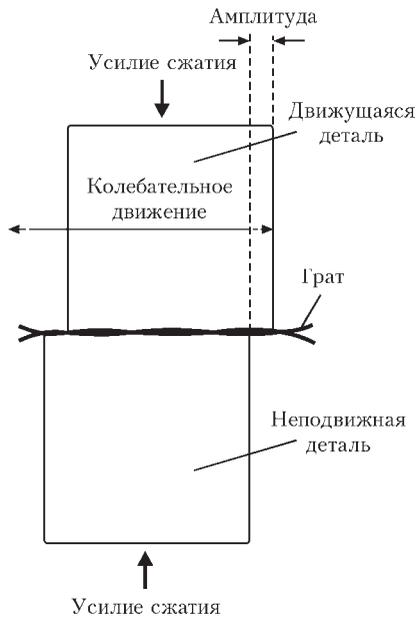


Рис. 1. Схема процесса ЛСТ

Механизм образования сварного соединения при ЛСТ аналогичен таковому при СТ вращением [9]. Образование сварного соединения проходит в следующей последовательности:

- начальная притирка поверхностей трения. В результате относительного перемещения поверхностей на контактирующих микровыступах происходит разрушение оксидных и жировых пленок с обнажением ювенильных участков, образуются и тут же разрушаются мостики схватывания;
- лавинообразное увеличение количества взаимодействующих микровыступов, а также фактической площади контакта и быстрое повышение температуры в стыке;
- начало осадки (вытеснение пластифицированного металла из стыка), увеличение температуры в стыке до определенного значения;
- квазистационарное (равновесное) состояние процесса трения. Мощность тепловыделения, температура в стыке, скорость осадки находятся на определенном установившемся уровне;

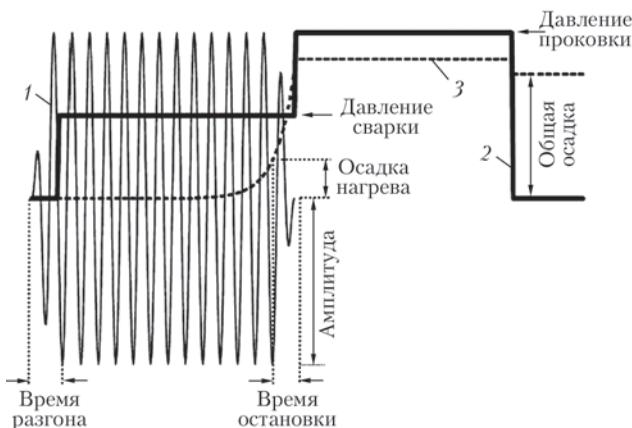


Рис. 2. Диаграмма изменения параметров режима ЛСТ во времени: 1 — амплитуда; 2 — усилие сжатия; 3 — осадка



Рис. 3. Сварное соединение титанового сплава при ЛСТ

- торможение, т. е. регулируемое снижение скорости относительного перемещения до нуля, в процессе которого образуется сварное соединение;
- проковка. Образовавшееся соединение подвергается деформации сжатия осевым усилием, которое, как правило, превышает усилие при нагреве.

В отличие от СТ при ЛСТ форма соединения характеризуется необычным гратом (рис. 3). На гранях в направлении возвратно-поступательного перемещения образуется существенно больший объем грата, что обусловлено перемещением пластифицированного металла преимущественно в направлении колебаний.

**Преимущества ЛСТ.** Данный способ позволяет получать качественные соединения из различных материалов таких, как титановые и никелевые сплавы, различные стали, алюминий и его сплавы, композиционные материалы (КМ) и др. Основным отличием ЛСТ от СТ вращением является возможность сварки в твердой фазе изделий с прямоугольным поперечным сечением. ЛСТ имеет ряд преимуществ, присущих и другим разновидностям СТ [6–9]:

- возможность соединения деталей из трудносвариваемых материалов как в одно-, так и разнородном сочетаниях;
- высокая производительность;
- высокое и стабильное качество соединений;
- гигиеничность – отсутствие выделения вредных газов, ультрафиолетового и электромагнитного излучений;
- отсутствие необходимости применения присадочных материалов, флюсов и защитных газов;
- соединение образуется в твердой фазе, структурные изменения в основном металле происходят на незначительную глубину;
- малое потребление энергии.

Основными недостатками ЛСТ являются высокая стоимость и сложность изготовления оборудования, обусловленные необходимостью использования высокоточных силовых приводов большой жесткости и сложных компьютеризированных систем управления [7–9].

**Параметры режима ЛСТ и свариваемые материалы.** Основными параметрами процесса ЛСТ являются частота и амплитуда возвратно-поступательных колебаний, давление при нагреве и проковке, время нагрева и проковки, величина осадки при нагреве и общая при сварке (см. рис. 2) [10]. К дополнительным параметрам ЛСТ, которые могут оказывать влияние на формирование соединений, относятся время разгона и остановки колебаний.

В работах [11, 12] представлены результаты исследований ЛСТ титанового сплава Ti-6Al-4V (Ti-64). Частота возвратно-поступательных колебаний при сварке достигала 119 Гц для амплитуды колебаний 0,92...3,0 мм. Показано, что для получения бездефектных соединений при ЛСТ необходимо превысить определенное значение удельной мощности тепловыделения, которое определяется как:

$$w = \frac{\alpha \cdot fP}{2\pi A}, \quad (1)$$

где  $\alpha, f$  — соответственно амплитуда и частота возвратно-поступательного перемещения;  $P$  — усилие;  $A$  — площадь поперечного сечения заготовок.

Получение качественных соединений (без пор и оксидных включений) возможно в случае одновременного обеспечения определенных критических условий — достаточно высоких значений амплитуды, частоты колебаний и давления сварки. По данным [12] важным параметром для формирования бездефектных швов является общая осадка заготовок, оптимальное значение которой отличается для различных конструкционных материалов.

В работе [13] приведены результаты исследований ЛСТ алюминия, стали и жаропрочных сплавов, которые проводили на тавровых соединениях типа «шпилька к пластине» с прямоугольным поперечным сечением шпильки 12×4 и 20×4 мм. Показано, что важными для ЛСТ являются три свойства металлического материала: жаропрочность, теплопроводность и коэффициент трения, зависящий от температуры. Материалы, которые быстро теряют прочность при нагреве и на большую глубину, в частности, алюминий и алюминиевый сплав системы AlMgSi1, лишь частично подходят для ЛСТ. Для их стабильного нагрева необходимо обеспечивать значительные амплитуды и частоты возвратно-поступательных перемещений при значительном усилии сварки.

В работе [14] проведена сравнительная характеристика ЛСТ и инерционной СТ. Исследование проводили на образцах из жаропрочного алюминиевого сплава Al-11,7%Fe-1,2%V-2,4%Si, полученного методами порошковой металлургии, а также этого сплава с алюминиевым сплавом 2024-T351. Показано, что при ЛСТ достигается мень-

шая интенсивность термомеханического цикла сварки, чем при инерционной СТ. Прочность соединения составляет около 81 % прочности соединений, полученных инерционной СТ, что связано с большим укрупнением зерна и меньшей твердостью в зоне соединения. Режим ЛСТ прутков диаметром 25 мм следующий: частота 50 Гц, амплитуда 2 мм, осадка 4 мм, усилия нагрева и проковки 30 и 50 кН.

В работах [6, 10, 13, 15] исследованы возможности ЛСТ при соединении различных сталей (углеродистой, нержавеющей, высокопрочной). Параметры режимов сварки варьировали в следующих пределах: частота колебаний 25...50 Гц, амплитуда 1...3 мм, усилие нагрева 40...240 МПа, осадка 1...3 мм. Авторы работ [6, 13] отмечают, что при ЛСТ углеродистой стали возникают проблемы — сварные соединения имеют подрезы по обе стороны от зоны соединения. Это объясняется низкой линейной скоростью (0,5 м/с), в то время как для сталей она должна быть не менее 1 м/с для обеспечения равномерного нагрева и стабильной деформации металла.

Испытания сварных образцов из углеродистой стали [15] на растяжение показали предел прочности 539...592 МПа с разрушением по основному металлу (ОМ). Наблюдается повышение микротвердости металла в зоне соединения более чем в 2 раза по сравнению с ОМ. При отклонении параметров режима ЛСТ от оптимальных значений в сторону уменьшения сварные соединения разрушаются по стыку с низкими показателями прочности.

Качественные соединения из нержавеющей стали AISI 316L [16] были получены при давлении сварки более 160 МПа и частоте колебаний не менее 40 Гц. Механические испытания показали предел прочности 594...610 МПа, относительное удлинение 40...49 % с разрушением по ОМ. Разрушение образцов, полученных при давлениях сварки менее 80 МПа либо при частоте колебаний в 25 Гц, происходило по сварному шву. Установлено, что максимальная скорость осадки, которая влияет на количество  $\delta$ -феррита в зоне соединения, достигается при высоких давлениях сварки и значениях амплитуды 1,5 мм, частоты 30 Гц.

Наибольшее количество публикаций посвящено исследованию ЛСТ различных титановых сплавов [6, 17–22], что обусловлено практическим применением ЛСТ при производстве сварных роторов компрессоров авиационных ГТД («блисков»). Авторами публикаций исследованы следующие диапазоны изменения параметров режима ЛСТ: амплитуда 0,5...3 мм, частота 15...150 Гц, давление при нагреве 50...190 МПа, давление проковки 320 МПа.



В работах [6, 17] изучены сварные соединения титанового сплава Ti-6Al-4V, полученные ЛСТ. При испытаниях сварных образцов сечением 25×6 мм на разрыв [6] прочность составила 835 МПа с разрушением по ОМ. При испытании на изгиб разрушение происходило в зоне соединения при угле загиба 50°. Механические испытания сварных соединений модельных образцов размерами 35×26×13 мм, полученных с ограничением осадки при сварке 1,75 мм, показали следующие результаты [17]: предел прочности 916...1004 МПа, относительное удлинение 13,7...15,2 %, предел текучести 841...968 МПа. Установлено повышение микротвердости в зоне соединения до 350 HV (по сравнению с 300 HV в ОМ) на расстояние ±0,6...1 мм от оси шва в зависимости от давления сварки.

В работе [18] исследована возможность применения ЛСТ для нового титанового псевдо-β-сплава Ti-5553 (Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr), а также для сплава IMI-834 (Ti-5,8Al-4Sn-3,5Zr-0,7Nb-0,5Mo-0,3Si). Механические испытания сварных образцов из сплава Ti-5553 показали, что предел прочности соединения составил 94 % прочности ОМ (1042 МПа), предел текучести — 96 % (1005 МПа), относительное удлинение — 36 % уровня ОМ. Наблюдается снижение микротвердости в зоне соединения более чем на 17 % по сравнению с уровнем ОМ на расстояние до ±1,6 мм от оси шва. С помощью термопар зафиксирована максимальная температура поверхности трения при ЛСТ сплава IMI-834 в интервале 750...800 °С. Показано, что для сплава сохраняется характер зависимости распределения микротвердости от параметров режима сварки, аналогично таковой для сплава Ti-64.

В работе [19] исследована ЛСТ титанового сплава Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo (Ti-6246). В зависимости от термообработки этот сплав в одном случае можно отнести к β-сплаву, в другом — к α+β-сплаву. Исследования проводили на образцах размером 60×36×15 мм. Сваривали β-сплав и α+β-сплав Ti-6246. Послесварочная термообработка — нагрев до 620 °С и выдержка 4 ч. При определенных параметрах режимов сварки достигается предел прочности сварных соединений (1078 МПа) на уровне 96 % значений ОМ менее прочного сплава α+β Ti-6246, предел текучести (1030 МПа) — 99 % показателя α+β Ti-6246.

В работах [20, 21] исследовано формирование разнородных соединений при ЛСТ титановых сплавов VT6 и VT8-1. Сварку проводили на образцах размером 35×26×13 мм с регламентацией осадки 2 мм. Механические свойства соединений составляли: предел прочности 990...1020 МПа, предел текучести 924...939 МПа, относительное

удлинение 11,39...13,78 % с разрушением по ОМ VT6 [21]. При испытании специальных образцов с выточкой по линии соединения [20] на статическое растяжение разрушение происходило по зоне термомеханического влияния (ЗТМВ) сплава VT8-1 (предел прочности 1194 МПа). При этом ширина ЗТМВ соединений не превышала 400 мкм, большая часть которой находилась со стороны сплава VT8-1.

С начала 2000-х годов возросло количество публикаций, посвященных исследованию ЛСТ жаропрочных никелевых суперсплавов. Исследуемый диапазон изменения параметров режима ЛСТ суперсплавов был следующий: амплитуда 2...3 мм, частота 40...100 Гц, давление 50...450 МПа.

В работе [22] исследован процесс ЛСТ никелевого сплава Waspaloy на образцах размером 18×13×11 мм. Установлено, что получение качественных соединений возможно при определенном, достаточно высоком значении всех технологических параметров ЛСТ (амплитуде, частоте, давлении). Показано, что на расстоянии 0,9 мм от поверхности трения (зона динамической рекристаллизации — ЗДР) температура металла превышала 1126 °С, что привело к растворению упрочняющей γ'-фазы и снижению микротвердости. На расстоянии 3,3 мм по обе стороны шва наблюдается снижение микротвердости на 40 % по сравнению со значениями ОМ. Получение качественных соединений (без пор и оксидных включений) достигается при осадке более 1,2 мм.

В работе [23] проведено исследование микроструктуры соединений никелевого сплава IN-738. Для ЛСТ использовали образцы размером 12,8×11,1×17,7 мм. В зоне соединения наблюдается полное растворение упрочняющей γ'-фазы на глубину 600 мкм по обе стороны от сварного шва. Установлено, что пик температуры во время сварки превысил 1230 °С.

В работе [24] проведено оптимизацию параметров ЛСТ никелевого сплава IN-718. При определенных условиях (для данного сплава: амплитуда 2 мм, частота 80 Гц, давление 70 МПа) на поверхности трения достигается температура около 1200 °С. Для ЗТМВ характерно снижение микротвердости на 25 % по сравнению с ОМ. Микроскопические исследования показали наличие дисперсных оксидов по всему сечению сварного шва, размеры и количество которых зависят от параметров режима сварки.

В работе [25] приведены результаты исследований ЛСТ суперсплава CMSX-486. В отличие от титановых сплавов, где грат имеет форму в виде «лепестков», общих для обеих деталей, для никелевых сплавов наблюдается разделение грата на два отдельных лепестка, что характерно для сое-

динений при СТ вращением. При испытании на растяжение образцы разрушались по ОМ. Следует также отметить, что проведенный в работах [23, 25] анализ микроструктуры сварных образцов никелевого суперсплава IN-738 и монокристаллического суперсплава CMSX-486 показал, что в сплавах в процессе ЛСТ может иметь место формирование участков расплава. Установлено, что приложение нагрузки сжатия на этапе проковки вызывает быструю кристаллизацию образуемой метастабильной жидкой фазы.

Авторы работы [26] исследовали возможность ЛСТ никелевого сплава ЭП742 на образцах размером  $35 \times 26 \times 13$  мм. Предел прочности сварных соединений составил 96...112 % требуемого ТУ значения, а относительное удлинение — 98...132 %. Ширина ЗДР и ЗТМВ соответственно составляла 0,6 и 0,8 мм. Наблюдается падение микротвердости в зоне соединения, что обусловлено деградацией упрочняющей  $\gamma'$ -фазы.

С помощью ЛСТ возможно получение качественных соединений КМ. В работе [27] исследованы соединения из КМ на основе алюминиевого сплава AA2124 (Cu — 3,8, Mn — 0,5, Mg — 1,4, Zn < 0,25), армированного частицами карбидов кремния 25 %. Использовали образцы размером  $80 \times 36 \times 15$  мм. Параметры режима сварки были следующими: частота колебаний 50 Гц, амплитуда 2 мм, усилие нагрева и проковки 185 МПа, осадка 2 мм. Механические испытания образцов показали, что предел прочности сварного соединения составляет 82 % уровня ОМ, условный предел текучести — 78 %, относительное удлинение — 60 % показателя ОМ. Наблюдается также снижение микротвердости в зоне сварки на 10 % по сравнению с ОМ композита 2124Al/25 об. %  $\text{SiC}_p$ .

Таким образом, как показывает анализ публикаций, экономически оправданными для применения ЛСТ являются никелевые и титановые сплавы, поскольку оправдывают затраты на создание специализированного оборудования для изделий авиационного двигателестроения. Свариваемость титановых сплавов изучена в одно- и разнородных сочетаниях, в то время как возможности ЛСТ су-

персплавов ограничены исследованиями соединений в однородном сочетании.

**Структура сварных соединений.** В целом структура металла при ЛСТ аналогична таковой при СТ вращением [9]. Типичная структура сварного соединения при ЛСТ на примере стали AISI 316L [16] приведена на рис. 4.

При ЛСТ металл в зоне соединения нагревается до температур, не превышающих температуру плавления, однако за счет теплопроводности и внешнего давления металл заготовок меняет свойства и структуру на некоторую глубину от поверхности трения. Как правило, в сварном соединении выделяют четыре зоны, отличающиеся текстурой и микроструктурой [9, 16, 28]:

1) ЗДР, или зона мелкого зерна — центральная часть сварного соединения. Здесь металл претерпевает фазовые превращения — образуется равноосная мелкокристаллическая динамически рекристаллизованная структура;

2) ЗТМВ характеризуется металлографической текстурой. Зерна и цепочки неметаллических включений вытянуты в направлении деформации. Для некоторых материалов в этой зоне также возможны фазовые превращения;

3) ЗТВ — область между ОМ и ЗТМВ, в которой могут происходить фазовые или структурные изменения, не связанные с процессом деформации;

4) зона ОМ — область, в которой нагрев при сварке не оказал заметного влияния на микроструктуру и механические свойства.

Исследования микроструктуры образцов из титановых сплавов Ti-6Al-4V в работе [18] и Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo в работе [19], полученных ЛСТ, показали, что ширина ЗДР и ЗТМВ прямо пропорциональна времени сварки и обратно пропорциональна осевому давлению, частоте и амплитуде колебаний. Установлено, что осевое давление является определяющим фактором, который влияет на размеры ЗДР и ЗТМВ.

Для соединений однородных материалов изменения структур симметричны относительно оси шва в отличие от таковых для соединений разнородных материалов [20, 28].

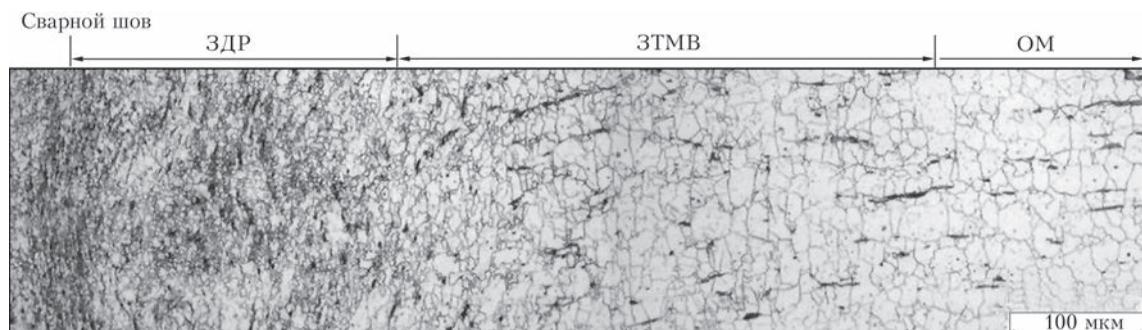


Рис. 4. Микроструктура сварного соединения стали AISI 316L



**Моделирование процесса ЛСТ.** В ряде работ сделана попытка расчетными методами описать энергетические характеристики процесса ЛСТ и определить температурный режим сварки различных материалов. Температуру в стыке при ЛСТ в момент перед выполнением осадки предложено в [29] определять по уравнению

$$T = T_0 + \frac{1}{c_p F_n \sqrt{4\pi a}} \int_0^t \frac{q(\tau)}{\sqrt{t_n - \tau}} \times \exp\left(-\frac{z^2}{4a(t-\tau)} - b(t_n - \tau)\right) d\tau, \quad (2)$$

где  $q(\tau)$  — закон изменения выделяемой мощности со временем;  $t_n$  — время нагрева;  $F_n$  — площадь поперечного сечения стержня;  $a$  — коэффициент температуропроводности;  $b$  — коэффициент теплоотдачи;  $c_p$  — объемная теплоемкость;  $T_0$  — начальный уровень температуры.

Мгновенная тепловая мощность  $q$  [7, 10], выделяемая при трении, может быть определена по формуле

$$q = F_{\text{тр}} v, \quad (3)$$

где  $F_{\text{тр}}$  — сила трения скольжения, равная

$$F_{\text{тр}} = Fk_{\text{тр}}; \quad (4)$$

$F$  — усилие сварки;  $k_{\text{тр}}$  — коэффициент трения;  $v$  — скорость скольжения (скорость относительного перемещения деталей).

Скорость скольжения [24, 27] зависит от амплитуды  $a$  и частоты  $f$  возвратно-поступательного движения. Для амплитуды, изменяемой по синусоидальному закону, средняя скорость скольжения  $v_{\text{ск}}$  составляет

$$v_{\text{ск}} = 4af. \quad (5)$$

Для синусоидального изменения амплитуды скорость скольжения постоянно варьируется от нуля на пике амплитуды до максимального значения при переходе через точку, в которой свариваемые заготовки соосны. Изменяется и давление в зоне контакта — на пике амплитуды оно имеет максимальное значение, а при прохождении через нуль — минимальное (соответствует усилию сварки).

Для определения полной энергии [10], необходимой для образования сварного соединения, выражение мгновенной тепловой мощности интегрируют по времени процесса сварки  $t$ :

$$E_x = \int_0^t q dt = \int_0^t F_{\text{тр}} v dt. \quad (6)$$

Сила трения зависит от целого ряда факторов [1, 21]: скорости относительного движения поверхностей трения; природы материала и наличия поверхностных пленок; температурного режима; значения нормального давления; жесткости и упругости узла трения; продолжительности не-

подвижного контакта; скорости приложения нагрузки; характера соприкосновения тел; размера поверхности; коэффициента взаимного перекрытия; качества поверхности и шероховатости.

Установлено [1], что при трении скольжения сталь по стали коэффициент трения может изменяться в широких пределах: 0,1...1 в зависимости от условий сварки. В работе [30] приведены данные об изменении в процессе ЛСТ коэффициента трения для титановых сплавов в пределах от 0,25 до 0,55.

Высокая интенсивность физико-химических процессов, происходящих в зоне соединения при ЛСТ, делают математическое моделирование этого способа сварки сложной задачей, которая решается с применением ЭВМ и специализированного программного обеспечения, основанного на методе конечных элементов. Для снижения времени и вычислительных мощностей используют упрощенные модели, например, расчет температурных полей без учета деформации материала, применение упрощенных двухмерных 2D-моделей вместо трехмерного 3D-моделирования; рассмотрение не всего процесса в целом, а отдельных его стадий; прогнозирование структуры отдельных зон сварного соединения [29–34].

Пример результата 2D-моделирования процесса ЛСТ приведен на рис. 5. Авторы работ [29–34] проводили расчет температурных полей при ЛСТ титановых сплавов. Установлено, что для исследуемых параметров режима сварки сплава ВТ6 около 30 % тепловой энергии, генерируемой в стыке во время процесса, отводится в грат вместе с пластифицированным металлом. Расчеты показывают, что в процессе сварки температура на поверхности трения достигает 1300 К, однако может доходить и до 1500 К в зависимости от параметров режима ЛСТ. При этом повышение температуры до 1000 °С длится менее 1 с [31]. В работе [33] проведены расчеты температурных полей для сварного соединения сплавов ВТ6 + ВТ8М-1; отмечена асимметричность температурных полей относительно линии соединения.

Помимо температурных полей, в работах [31, 32] моделировали образование грата. Установлено, что топология грата зависит от параметров режима сварки. Для получения бездефектных соединений необходимо полное обновление первоначальных поверхностей трения и удаление загрязнений в грат.

Скорость осадки зависит от давления, амплитуды и частоты колебаний. С их увеличением возрастает скорость деформации и осадки, снижается толщина зоны пластифицированного металла и уменьшается необходимая для очистки поверхностей величина осадки. С увеличением скоро-

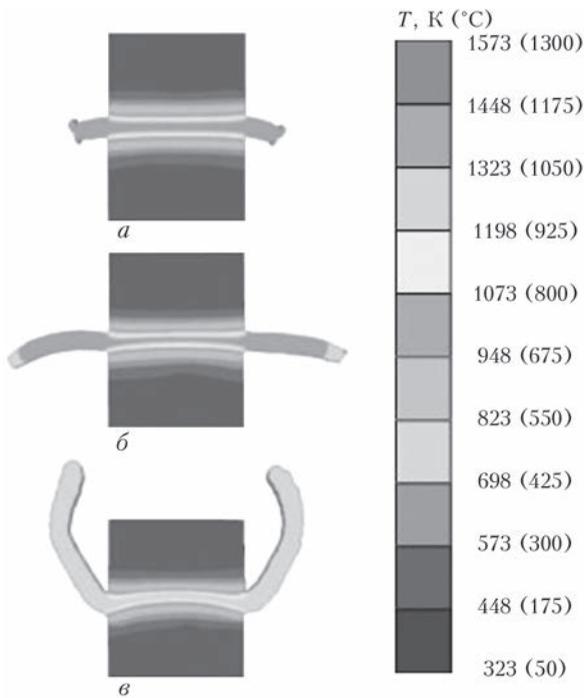


Рис. 5. Результаты 2D-моделирования ЛСТ сплава Ti-64 для низких (а), средних (б) и высоких (в) давлений сварки [34]

сти трения возрастает максимальная температура в стыке, а с ростом давления сварки – снижается.

Авторы работы [31] предложили модель для прогнозирования структуры ЗТВ сварного соединения сплава Ti-64, поскольку эта зона характеризуется минимальной прочностью и твердостью. Размер зерен  $\beta$ -фазы является основным показателем механических характеристик в ЗТВ данного сплава. Поэтому модель основана на расчете размера зерен  $\beta$ -фазы после ЛСТ в зависимости от режима сварки и размера зерен перед началом процесса.

В работе [30] проведено моделирование ЛСТ звеньев круглозвенных цепей из стали 30CrNiMo8. Рассмотрено изменение температуры в процессе сварки в двух точках, отдаленных на 3,5 и 4,5 мм от стыка. Данные, полученные расчетным путем, незначительно отличаются от экспериментальных. Разница между расчетными и экспериментальными данными по осадке образцов составила 13 %.

Моделирование процесса ЛСТ ограничивается преимущественно титановыми сплавами, что обусловлено актуальностью использования этого способа сварки при изготовлении компонентов авиационных ГТД. Формирование соединений при ЛСТ никелевых суперсплавов, интерметаллидов на основе Ni–Al, Ti–Al и КМ в одно- и разнородном сочетаниях в достаточной мере не освещено в литературе, что обуславливает актуальность проведения дальнейших исследований.

## Выводы

1. Потребность ведущих предприятий авиационного двигателестроения обусловила актуальность разработки технологий и оборудования для ЛСТ деталей из высокопрочных и жаропрочных сплавов. ЛСТ позволяет получать качественные соединения титановых сплавов, различных сталей, жаропрочных никелевых сплавов, КМ.

2. Структура соединений при ЛСТ аналогична таковой для других разновидностей СТ. Ширина характерных участков соединения (зоны динамической рекристаллизации, термомеханического и термического влияния) зависит от параметров режима ЛСТ – осевого усилия, времени сварки, амплитуды и частоты колебаний.

3. Математическое моделирование процесса ЛСТ, основанное на методе конечных элементов, позволяет оценить термомеханические условия формирования соединений и прогнозировать структурные изменения материалов в зоне сварки.

4. Проблемой остается снижение стоимости и повышение надежности оборудования для реализации процесса ЛСТ жаропрочных и высокопрочных материалов, что ограничивает область применения ЛСТ, преимущественно предприятиями аэрокосмической промышленности.

5. Актуально проведение дальнейших исследований по ЛСТ никелевых суперсплавов, интерметаллидов на основе Ni–Al, Ti–Al и КМ в одно- и разнородном сочетаниях.

1. *Сварка трением: Справочник* / В. К. Лебедев, И. А. Черненко, В. И. Вилль и др. – Л.: Машиностроение, 1987. – 236 с.
2. *Vill V. I. Friction welding of metals.* – New York: American Welding Soc., 1962. – 114 p.
3. *Вавилов А. Ф., Воинов В. П.* Сварка трением. – М.: Машиностроение, 1964. – 156 с.
4. *Pat. Caterpillar Tractor Co, US3420428-A. Bonding apparatus – friction welding by reciprocal motion* / R. Maurya, J. Kauzlarich. – Publ. 1969.
5. *Кулис Э. И., Локишин Р. Ф.* Сварка пластмасс трением // Свароч. пр-во. – 1982. – № 1. – С. 8–9.
6. *Nicholas E. D., Hone P.* Developments in friction and MIAB welding // *Welding Institute Bulletin.* – 1989. – R382/11/89.
7. *Nicholas E. D.* Linear friction welding. – Düsseldorf: DVS-Verl., DVS Berichte. – 1991. – 139. – S. 18–24.
8. *Nicholas E. D.* Friction surfacing and linear friction welding // *International SAMPE metals and metals proc. conf., Covina, CA, USA.* – 1992. – P. 450–463.
9. *Solid state joining of metals by linear friction welding: a literature review* / I. Bhamji, M. Preuss, P. L. Threadgill, A. C. Addison // *Mater. Sci. & Technol.* – 2010. – 27, 2011. – № 1. – P. 2–12.
10. *Energy and force analysis of linear friction welds in a medium carbon steel* / Usani U. Ofem, P. A. Colegrove, A. Addison, M. J. Russell // *Sci. and Technol. of Welding & Joining.* – 2010. – 15, № 6. – P. 479–485.
11. *Vairis A., Frost M.* High frequency linear friction welding of a titanium alloy // *Wear.* – 1998. – 217. – P. 117–131.
12. *Wanjara P., Jahazi M.* Linear friction welding of Ti–6Al–4V: Processing, microstructure, and mechanical-property interrelationships, metal // *Mater. Trans. A.* – 2005. – 36. – P. 2149–2164.

13. *Netwig A.* Entwicklung und Trinds beim Reilschweißen // Der Praktiker. – 1993. – № 9. – S. 546–555.
14. *Koo H. H., Baeslack W. A.* Friction welding of rapidly solidified Al-Fe-V-Si alloy // Welding J. – 1992. – № 5. – P. 20–24.
15. *Addison A., Threadgill P.* Initial studies of linear friction welding of C-Mn steel // Welding and Cutting. – 2010. – № 4. – P. 364–370.
16. *Linear friction welding of AISI 316L stainless steel / I. Bhamji, M. Preuss, P. L. Threadgill et al.* // Mater. Sci. and Eng. A. – 2010. – **528**. – P. 680–690.
17. *Kallee S. W., Nicholas E. D., Russell M. J.* Friction welding of aeroengine components // The 10th World conf. on titanium Ti-2003. – Hamburg, Germany, 2003. – P. 2859–2867.
18. *Evolution of microstructure, microtexture and mechanical properties in linear friction welded titanium alloys // digitool.library.mcgill.ca/thesisfile 103485.pdf.*
19. *Fracture behaviour of linear friction welds in titanium alloys / M. Corzo, Y. Torres, M. Anglada, A. Mateo // Anales de la Mecanica de Fractura. – 2007. – 1. – P. 75–80.*
20. *Исследование микроструктуры в зоне сварного шва при линейной сварке трением титановых сплавов BT6 и BT8 / Г. С. Дьяконов, Н. Ф. Измайлова, В. М. Бычков и др. // Вестн. Укр. гос. авиац. техн. ун-та. – 2012. – 16, № 7. – С. 48–52.*
21. *Применение линейной сварки трением для соединения сплавов BT6 и BT8-1 / А. Ю. Медведев, В. М. Бычков, А. С. Селиванов и др. // Там же. – 2012. – 16, № 7. – С. 63–67.*
22. *Mechanical property and microstructure of linear friction welded WASPALOY / A. Chamanfar, M. Jahazi, J. Gholipour et al. // Metallurg. and Mater. Trans. A. – 2011. – 42, March. – P. 729–744.*
23. *Analysis of microstructural changes induced by linear friction welding in a nickel-base superalloy / O. T. Ola, O. A. Ojo, P. Wanjara, M. C. Chaturvedi // Ibid. – 2012. – 42, Dec. – P. 3761–3777.*
24. *Linear friction welding of IN-718 process optimization and microstructure evolution http://www.scientific.net/AMR.15-17.357.*
25. *A study of linear friction weld microstructure in single crystal CMSX-486 superalloy / O. T. Ola, O. A. Ojo, P. Wanjara, M. C. Chaturvedi // Metallurg. and Mater. Trans. A. – 2012. – 43, March. – P. 921–933.*
26. *Исследование свариваемости жаропрочного никелевого сплава ЭП742 методом линейной сварки трением / В. М. Бычков, А. С. Селиванов, А. Ю. Медведев и др. // Вестн. гос. авиац. техн. ун-та. – 2012. – 16, № 7. – С. 112–116.*
27. *Mechanical and microstructural characterization of 2124Al/25 vol.%SiC joints obtained by linear friction welding (LFWptA) / F. Rotundo, L. Ceschini, A. Morri et al. // Composites. – 2010. – 41. – P. 1028–1037.*
28. *Влияние величины осадки на формирование сварного соединения при линейной сварке трением / М. В. Караваева, С. К. Киселева, В. М. Бычков и др. // Письма о материалах. – 2012. – 2. – С. 40–44.*
29. *Моделирование температурного поля при линейной сварке трением / А. Ю. Медведев, С. П. Павлинич, В. В. Атрощенко, Н. И. Маркелова // Вестн. Укр. гос. авиац. техн. ун-та. – 2010. – 14, № 2. – С. 75–79.*
30. *Wen-Ya Li, Tiejun Ma, Jinglong Li.* Numerical simulation of linear friction welding of titanium alloy: Effects of processing parameters // Materials and Design. – 2010. – **31**. – P. 1497–1507.
31. *Process modelling of ti-6al-4v linear friction welding (LFW) / M. Grujicic, G. Arakere, B. Pandurangan et al. // J. Mater. Eng. and Performance. – 2012. – 21(10), Oct. – P. 2011–2023.*
32. *The importance of materials data and modelling parameters in an FE simulation of linear friction welding http://www.hindawi.com/journals.*
33. *Computer modelling of linear friction welding based on the joint microstructure / S. K. Kiselyeva, A. M. Yamileva, M. V. Karavaeva et al. // J. Eng. Sci. and Technol. Review. – 2012. – 5. – P. 44–47.*
34. *Linear friction welding of Ti-6Al-4V modelling and validation / R. Turner, J.-C. Gebelin, R. M. Ward, R. C. Reed // Acta Materialia. – 2011. – 59. – P. 3792–3803.*
35. *Linear friction welding of high strength chains http://www.raiser.de/download/innovationspreis/bewerber2013/Linear\_Friction\_Welding\_of\_High\_Strength\_Chains\_Mucic-Fuchs-Enzinger.pdf.*

Поступила в редакцию 09.10.2014

## VI выставка Индия – Эссен «Сварка & Резка»

В конце октября 2014 г. в выставочном центре Бомбея состоялась очередная VI выставка Индия – Эссен «Сварка & Резка», в которой приняло участие более 130 компаний из 14 стран. Выставку посетило около 10600 специалистов сварочной индустрии Индии, одной из самых динамичных индустрий мира.



[www.india-essen-welding-cutting.com](http://www.india-essen-welding-cutting.com)

## КОНТАКТНАЯ СТЫКОВАЯ СВАРКА ОПЛАВЛЕНИЕМ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗ ТЕРМИЧЕСКИ УПРОЧНЯЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

П. Н. ЧВЕРТКО, Л. А. СЕМЕНОВ, К. В. ГУЩИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Тонкостенные профили из высокопрочных алюминиевых сплавов нашли применение в продольных силовых наборах летательных аппаратов и прочих ответственных конструкциях. В промышленности применяются серийные профили, термически обработанные на максимальную прочность, что исключает возможность соединения их способами сварки плавлением. Актуальна проблема получения сварных соединений данных элементов силового набора в твердой фазе. Целью настоящей работы является изучение формирования соединений тонкостенных профилей разно- (АК6+Д16) и однородных (В95) алюминиевых сплавов в упрочненном состоянии при контактной стыковой сварке непрерывным оплавлением. Исследованы особенности контактной стыковой сварки с формированием соединений при осадке с экструзией и разработана базовая технология, которая применяется для получения соединений деталей из алюминиевых сплавов. Данная технология позволяет значительно повысить качество сварных соединений этой группы сплавов, а также расширить диапазон толщин металла, который соединяется контактной сваркой оплавлением. Приведены основные параметры режима контактной стыковой сварки непрерывным оплавлением. Исследованы структура металла и перераспределение легирующих элементов в зоне сварного шва. Прочностные свойства сварных соединений составляют не менее 90 % прочности основного металла. Библиогр. 6, рис. 8.

*Ключевые слова:* контактная стыковая сварка, непрерывное оплавление, осадка, формирование соединений, алюминиевые сплавы

Сплавы В95, Д16 и АК6 широко применяют при производстве ответственных элементов и конструкций в авиа- и ракетостроении. Так, в настоящее время для изготовления продольного силового набора корпусов авиационной и ракетно-космической техники из сплавов В95, АК6+Д16 применяют клепаные соединения, так как эти сплавы относятся к группам трудносвариваемых. Существенным недостатком клепаного соединения является увеличение массы конструкции из-за появления вспомогательных элементов при клепке стыкуемых элементов (рис. 1, а). Клепка является трудоемкой операцией, сопряженной с тяжелыми условиями труда. Необходима тщательная обработка поверхности отверстия под заклепку для надежного соединения изделия. В процессе длительной эксплуатации клепаное соединение подвержено расшатыванию, что отражается на ресурсе работы изделий.

Применение сварки вместо клепки (рис. 1, б) является одним из эффективных способов решения проблемы повышения прочности, качества соединений и повышения тактико-технических характеристик летательных аппаратов, в частности, снижение массы конструкции и соответственно повышение полезного груза летательных аппаратов [1].

Одними из основных узлов силовых элементов конструкций летательных аппаратов являются

соединения стрингер-фитинг. Стрингеры изготавливают из тонкостенных профилей в большинстве случаев таврового сечения из высокопрочных термически упрочненных сплавов Д16, В95 и пр. Фитинги изготавливают фрезерованием из

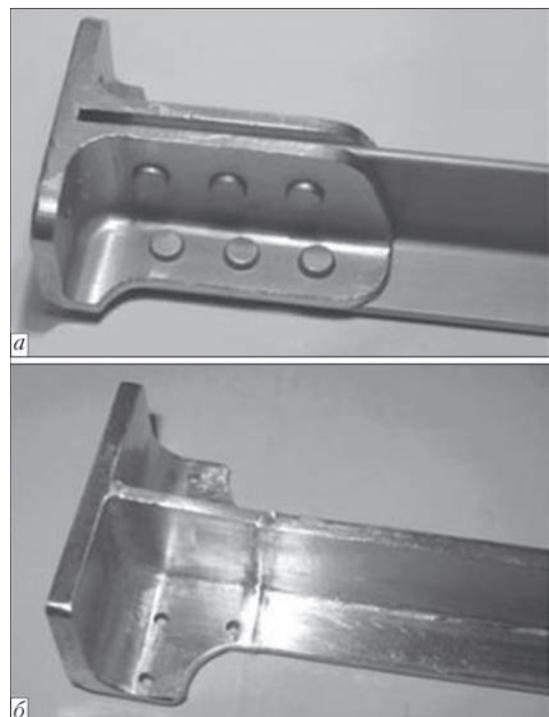


Рис. 1. Соединение элементов типа фитинг-стрингер продольного силового набора летательных аппаратов клепкой (а) и контактной стыковой сваркой (б)



различных заготовок (например, поковок из сплава АК6 или плит того же сплава, что и стрингерные панели).

В связи с этим проведена оценка свариваемости тонкостенных профилей развитого сечения из сплава В95Т1 и пластин из сплавов Д16Т+АК6Т1 между собой.

Полуфабрикаты из сплавов Д16 и В95 нашли широкое применение в промышленности. Эти сплавы упрочняются термической обработкой и в результате приобретают высокие механические свойства и сохраняют достаточную технологическую пластичность.

Среди высокопрочных сплавов на основе алюминия наибольшее применение в ракетно-космических и авиационных конструкциях получил сплав В95, который относится к системе Al–Zn–Mg–Cu (5,0...7,0 % Zn, 1,8...2,8 % Mg, 1,4...2,0 % Cu). Цинк, магний и медь образуют с алюминием и между собой твердые растворы и различные металлические соединения — фазы М ( $MgZn_2$ ), S( $Al_2CuMg$ ), T( $Al_2Mg_3Zn_3$ ), играющие большую роль в упрочнении сплава при его термической обработке.

Д16 — сплав, по крайней мере, шести компонентов: алюминия, меди, магния, марганца, железа и кремния, хотя основными легирующими элементами являются медь и магний (3,8...4,9 % Cu, 1,2...1,8 % Mg), поэтому его относят к сплавам системы Al–Cu–Mg.

Сплав АК6 системы легирования Mg–Si–Cu в основном используется в виде поковок, получаемых преимущественно из прессованных прутков. Основными легирующими элементами являются магний, кремний и медь (0,6...1,0 % Mg, 0,9...1,0 % Si, 2,0 % Cu). Сплав широко применяется в промышленности (строительстве, транспортном машиностроении, авиации) для изготовления штампованных и кованных деталей сложной формы, а также для нагруженных деталей типа рам, фитингов и др. Микроструктура сплава АК6 после термической обработки состоит из зерен твердого раствора алюминия и включений металлических соединений  $CuAl_2$  и

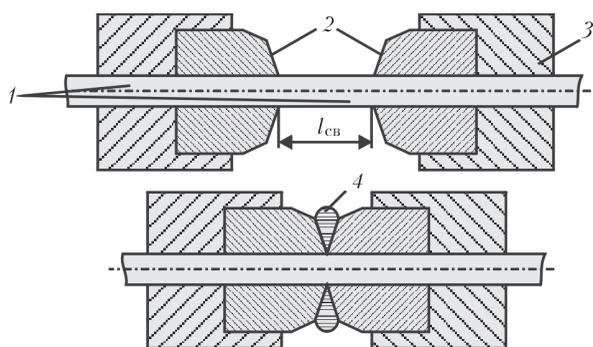


Рис. 2. Схема КСС с формированием соединения: 1 — детали; 2 — формирующие устройства; 3 — токоподвод; 4 — экструдированный металл ( $l_{св}$  — припуск на сварку)

$Mg_2Si$ . Сплав АК6 менее чувствительный к нагреву чем сплавы Д16 и В95 [2, 3].

Термомеханически упрочненные сплавы очень чувствительны к нагреву. Степень разупрочнения зависит от температуры нагрева и времени пребывания при ней. При сварке наиболее высокие механические свойства можно получить в том случае, когда длительность нагрева до температур выше критических не превышает определенных пределов [4]. Такой температурный цикл сложно обеспечить при сварке алюминиевых сплавов вследствие их большой теплопроводности. Необходимо интенсивное высококонцентрированное вложение тепла в зону нагрева.

Одним из наиболее перспективных способов получения качественных сварных соединений с высокими механическими свойствами является контактная стыковая сварка (КСС) непрерывным оплавлением.

Целью настоящей работы является изучение особенностей формирования соединений тонкостенных профилей разно- (Д16+АК6) и однородных (В95) алюминиевых сплавов в упрочненном состоянии при КСС непрерывным оплавлением с экструзией.

Процесс сварки происходит в автоматическом режиме, который обеспечивает высокое стабильное качество соединения. Конструкция сварочного оборудования и технологической оснастки обеспечивают совмещение сборочно-сварочных операций в едином цикле и высокую точность геометрических размеров сварного соединения [5].

Обязательным условием получения качественных сварных соединений из алюминиевых сплавов является формирование соединения с экструдированием металла при осадке в зазор между формирующими устройствами. При этом степень деформации увеличивается по мере сближения ножей [6]. Схема процесса КСС с формированием соединения приведена на рис. 2. Формирующие устройства выполняют две важные функции: при осадке они формируют соединение в условиях объемно-пластической деформации, а также выполняют функцию ножей для срезки грата. В результате образуется сварное соединение, которое

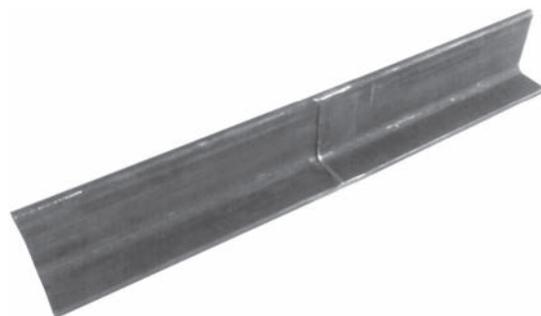


Рис. 3. Сварное соединение таврового профиля из алюминиевого сплава В95Т1

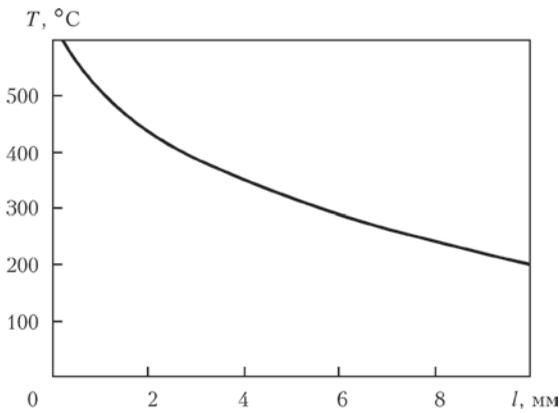


Рис. 4. Распределение температуры в глубину  $l$  разогретой оплавлением приконтактной зоны пластины толщиной 4,0 мм из сплава Д16Т перед осадкой

практически не нуждается в дальнейшей механической зачистке от графа (рис. 3).

Сварку сплавов разных систем легирования (Д16Т и АК6Т1) проводили на пластинах толщиной 2,5...5,0, шириной 25...35 мм.

С целью макетирования сварного соединения элементов типа фитинг-стрингер исследования проводили на тавровом профиле из сплава В95Т1 толщиной полк  $\delta = 2,5$  и 4,0 мм. Для экспериментов по сварке профилей разработана сварочная оснастка в виде кондукторов.

Сварку образцов проводили на универсальной лабораторной машине для КСС непрерывным оплавлением, которая была оснащена пневмогидравлическим приводом осадки с усилием  $F_{ос} = 130$  кН и сварочным трансформатором мощностью 150 кВ·А.

Различия в физических свойствах сплавов (теплопроводность сплава АК6 на 30 % выше чем сплава Д16 [2, 3]) значительно влияют на их нагрев во время оплавления, формирование шва, характер деформации и структурных превращений в зоне термического влияния.

Выбор и последующую корректировку режимов сварки проводили экспериментально с учетом приведенных выше особенностей сплавов. В процессе отработки режимов сварки проводили экспресс-анализ качества сварных соединений — загиб образцов с надрезом по шву до разрушения. Качество соединений оценивали по наличию или отсутствию дефектов при визуальном осмотре разрушенного образца по шву (оксидных плен и т. п.). В режимах сварки стремились минимизировать время сварки для уменьшения разупрочнения металла при нагреве. По изложенной методике были определены оптимальные режимы, которые обеспечивают отсутствие дефектов по линии соединения.

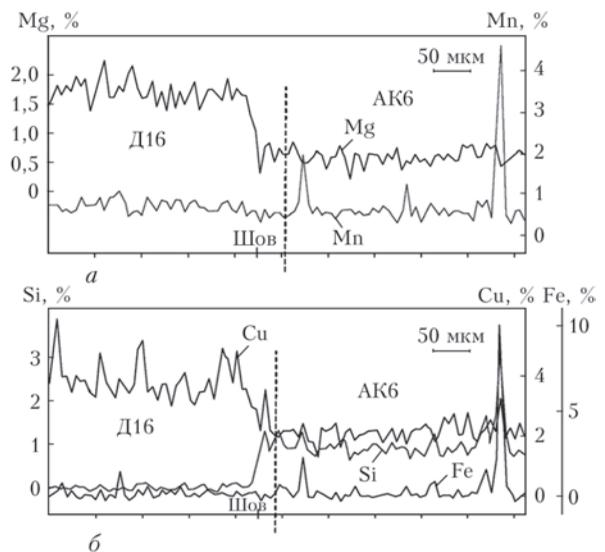


Рис. 5. Распределение элементов в сварном соединении (а) и зоне термического влияния (б)

Основные параметры сварки: вторичное напряжение  $U_{2x,x} = 4$  В, скорость оплавления изменяется экспоненциально от 2 до 25 мм/с, скорость осадки не менее 250 мм/с, время сварки — не более 5 с.

Распределение температуры в приконтактной зоне разогретых оплавлением кромок непосредственно перед осадкой приведено на рис. 4.

Для определения перераспределения легирующих элементов между сплавами в шве был выполнен микрорентгеноспектральный анализ сварных соединений АК6Т1+Д16Т (рис. 5). Переходная зона перераспределения легирующих элементов в шве составляет приблизительно 300 мкм. За переходной зоной содержание легирующих элементов соответствует составу основного металла.

В процессе осадки в результате экструзии металла между формирующими устройствами образуется текстура сварного соединения с характерным разворотом волокон основного металла на 90°. На рис. 6 приведены макроструктуры сварных соединений. Микроструктура зоны соединения характеризуется деформированными вы-

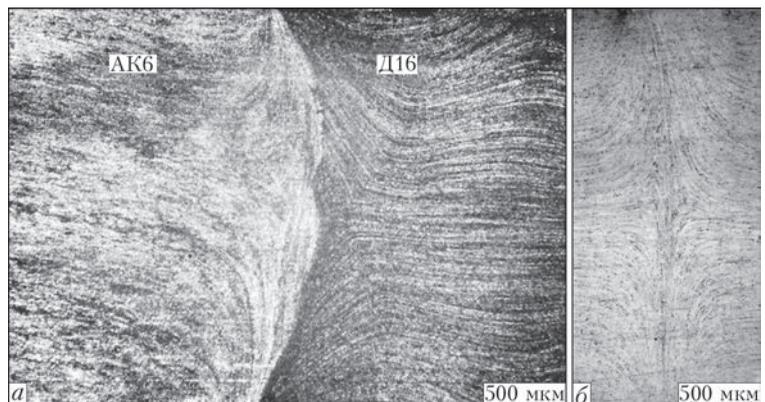


Рис. 6. Макроструктура стыка сварного соединения: а — АК6+Д16; б — В95

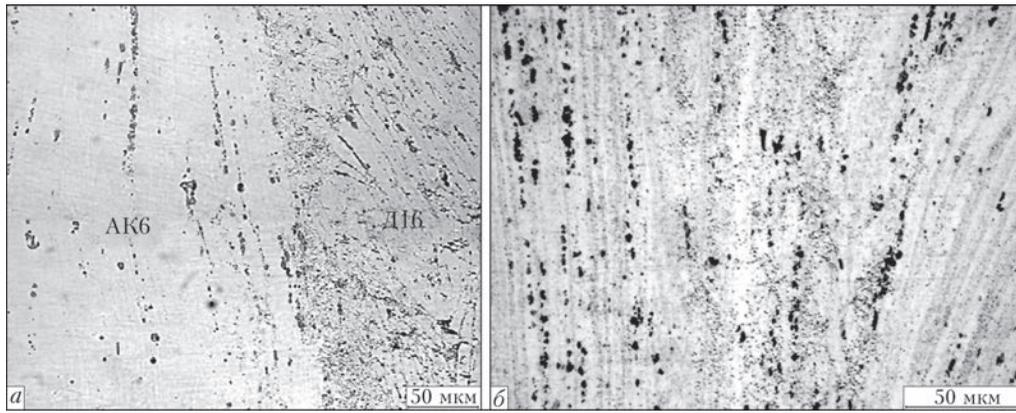


Рис. 7. Микроструктура шва сварного соединения из сплавов АК6Т1+Д16Т (а) и В95Т1 (б)

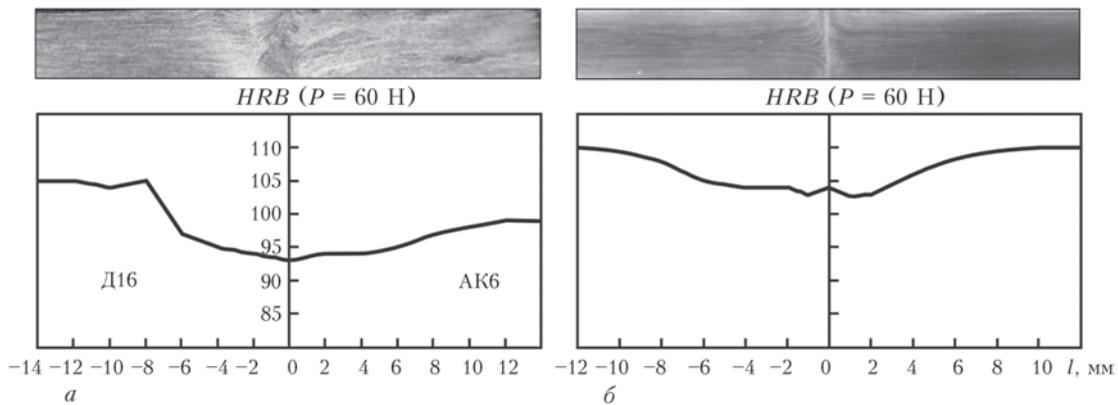


Рис. 8. Распределение твердости в сварном соединении пластин из сплавов АК6Т1+Д16Т (а) и профиля из сплава В95Т1 (б)

тянутыми зернами твердого раствора с высокой плотностью интерметаллидных фаз в виде продолговатых цепочек (рис. 7). По мере приближения к шву интерметаллидные включения измельчаются. В структуре сварного соединения профиля из сплава В95Т1 образуется сварной шов шириной 6,0 мкм, который имеет характерную мелкозернистую структуру твердого раствора и измельченных интерметаллидных фаз размером 1,0...2,0 мкм.

Согласно результатам проведенных исследований распределения твердости металла в сварных соединениях (рис. 8) общее значение зоны термического влияния составляет 15...20 мм, максимальное разупрочнение сварного шва не превышает 6 %.

Результаты механических испытаний основного металла и сварных образцов из сплавов АК6Т1+Д16Т показали прочность сварных соединений на уровне основного металла менее прочного сплава АК6Т1 ( $\sigma_{\text{в}}^{\text{св}} = 386$  МПа,  $\sigma_{\text{осн АК6}} = 387$  МПа,  $\sigma_{\text{в}}^{\text{осн Д16}} = 455$  МПа). Образцы разрушались по зоне термического влияния со стороны сплава АК6Т1.

Прочность сварных соединений профиля из сплава В95Т1 находится на уровне выше 90 %

прочности основного металла ( $\sigma_{\text{в}}^{\text{св}} = 521...542$  МПа,  $\sigma_{\text{в}}^{\text{осн В95Т1}} = 580$  МПа).

По полученным результатам исследований можно сделать положительный вывод о перспективности применения технологии КСС непрерывным оплавлением для соединения элементов тонкостенных профилей из высокопрочных алюминиевых сплавов в ответственных конструкциях. Данная технология позволяет сваривать элементы конструкции в термически упрочненном состоянии с потерей прочности не более 10 %.

1. Николаев Г. А., Фридляндер И. Н., Арбузов Ю. П. Свариваемые алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1990. – 296 с.
2. Алюминиевые сплавы. Применение алюминиевых сплавов: Справ. руководство / Под ред. А. Т. Туманова, И. Н. Фридляндера. – М.: Металлургия, 1973. – 408 с.
3. Промышленные алюминиевые сплавы: Справочник / Под ред. Ф. И. Квасова, И. Н. Фридляндера. – М.: Металлургия, 1984. – 528 с.
4. Особенности контактной стыковой сварки высокопрочного алюминиевого сплава 2219 / С. И. Кучук-Яценко, П. Н. Чвертко, Л. А. Семенов и др. // Автомат. сварка. – 2010. – № 3. – С. 9–12.
5. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением. – Киев: Наук. думка, 1992. – 236 с.
6. Контактная стыковая сварка изделий из высокопрочных сплавов на основе алюминия / С. И. Кучук-Яценко, П. Н. Чвертко, Л. А. Семенов и др. // Автомат. сварка. – 2013. – № 7. – С. 3–7.

Поступила в редакцию 19.05.2014

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСНО-ЛЕГИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ТЕРМОЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСПЫЛЕНИЯ, В ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОКАХ

А. П. ЖУДРА, С. Ю. КРИВЧИКОВ, В. И. ДЗЫКОВИЧ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В настоящей статье представлены результаты оценки влияния комплексно-легированных порошков (КЛП) на сварочно-технологические свойства порошковых проволок и служебные характеристики наплавленного металла. Рассмотрена возможность обеспечения высокой степени легирования порошковой проволоки при уменьшении ее диаметра. Определены триботехнические характеристики металла, наплавленного порошковыми проволоками с использованием в качестве наполнителя комплексно-легированных порошков. Представлены результаты металлографических исследований наплавленного металла. Установлено, что использование КЛП в качестве сердечника порошковых проволок оказывает положительное влияние на характер плавления и переноса электродного металла, что приводит к улучшению их сварочно-технологических характеристик. Исследования наплавленного металла на износостойкость показали повышение износостойкости наплавленного металла, работающего в условиях абразивного изнашивания и трения металла по металлу. Библиогр. 4, табл. 5, рис. 3.

*Ключевые слова:* порошковая проволока, термоцентробежное распыление слитков, комплексно-легированные порошки, сварочно-технологические характеристики порошковой проволоки, триботехнические характеристики наплавленного металла

Порошковые проволоки, производимые по ГОСТ 26101–84, имеют сердечник, в котором легирующая часть состоит из дробленых ферросплавов и порошков металлов. Для обеспечения высокой степени легирования, как правило, возникает необходимость применения больших (40...50 %) значений коэффициента заполнения. Это, в свою очередь, приводит к увеличению диаметра порошковой проволоки до 3,2 мм и более. Для стабильного процесса наплавки такой порошковой проволокой требуется значительный ток (400...500 А) и напряжение дуги (28...32 В), что для некоторых типов восстанавливаемых деталей, чувствительных к воздействию высоких температур, склонных к термической деформации и т. п., является нецелесообразным или недопустимым (в таких случаях использование порошковых проволок большого диаметра приводит к значительным энергозатратам). Таким образом, решение задачи уменьшения диаметра порошковой проволоки при сохранении требуемого уровня ее легирования представляет практический интерес.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан технологический процесс получения комплексно-легированных порошков (КЛП), который заключается в выплавке из смеси ферросплавов и других легирующих материалов слитка цилиндрической формы требуемого химического состава и его последую-

щем плазменно-дуговым термоцентробежным распылением на режимах, обеспечивающих получение сферических частиц порошка необходимого гранулометрического состава. При этом химический состав каждой частицы должен соответствовать расчетному составу наплавочных электродных материалов: порошковых проволок, лент, присадочных прутков, штучных электродов и т. п.

Кроме того, сферическая форма частиц КЛП (рис. 1, б), в отличие от частиц неправильной формы (рис. 1, а), обеспечит более плотную компоновку сердечника и даст возможность уменьшить диаметр порошковой проволоки.

Вместе с тем замена механической смеси неоднородных по структуре, свойствам и химическому составу материалов сердечника на КЛП повлечет за собой изменения его электрических и теплофизических свойств. Это, в свою очередь, окажет влияние на сварочно-технологические характеристики порошковой проволоки и, возможно, на свойства наплавленного металла.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния КЛП на сварочно-технологические характеристики порошковых проволок и износостойкость наплавленного металла. Ранее [1] в ИЭС им. Е. О. Патона были выполнены исследования по применению в качестве сердечника порошковой проволоки ПП-Нп-25Х5ФМС гранулированного сплава соответству-

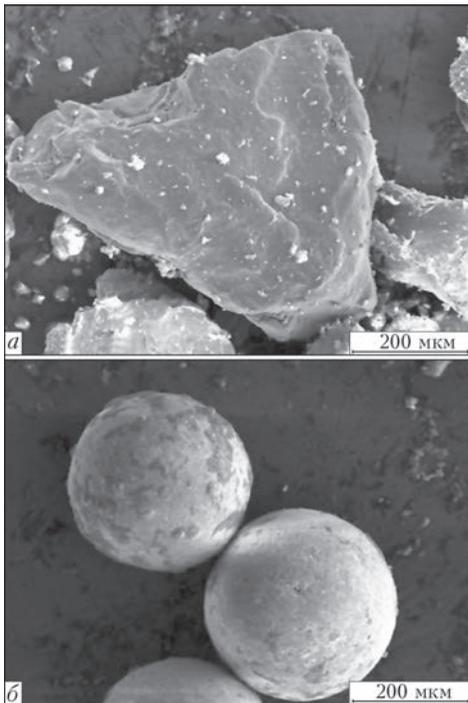


Рис. 1. Внешний вид дробленых частиц ферросплавов (а) и сферических гранул, полученных методом термоцентробежного распыления (б)

ющего состава. Основное внимание в этой работе было уделено повышению термостойкости наплавленного металла.

Нами в качестве объектов исследований были выбраны две порошковые проволоки другого типа: ПП-АН170 (ПП-Нп-80Х20РЗТ), применяющаяся для износостойкой наплавки деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного и гидроабразивного изнашивания (зубья ковшей экскаваторов, козырьки драг и др.), и ПП-АН160 (ПП-Нп-200ХГР), используемая для износостойкой наплавки деталей, работающих в условиях трения металла по металлу со смазкой (чугунные коленчатые валы двигателей автомобилей).

Таблица 1. Химический состав КЛП для изготовления порошковых проволок

Тип порошковой проволоки	Содержание элементов, мас. %							
	C	Cr	Mn	Si	Ti	B	Al	Fe
ПП-АН170	3,0	50,0	4,0	4,0	1,5	8,0	-	-
ПП-АН160	19,0	5,0	9,0	13,0	5,0	1,0	2,0	Ост.

Таблица 2. Сварочно-технологические характеристики опытных порошковых проволок

Тип порошковой проволоки	Показатели сварочно-технологических параметров			Режимы наплавки и диаметры порошковых проволок		
	$\Psi_p, \%$	$b/h$	$K_v, \%$	$I_{np}, A$	$U_d, B$	$d_{п.п}, мм$
ПП-АН170	16,8	2,0	25,6	280...300	26...28	3,2
ПП-АН170СФ	9,2	4,3	18,5	220...240	22...24	2,6
ПП-АН160	7,4	4,5	9,4	170...180	21...22	1,8
ПП-АН160СФ	6,2	5,0	7,2	140...150	18...20	1,6

Для проведения сравнительных испытаний были изготовлены две пары порошковых проволок: первая — ПП-АН170 и ПП-АН170СФ, вторая — ПП-АН160 и ПП-АН160СФ. В каждой паре первая порошковая проволока изготовлена в соответствии с требованиями ГОСТ 26101–84, а вторая — с применением в качестве сердечника КЛП.

Химический состав КЛП, полученных методом термоцентробежного распыления на установке ОБ-2327 [2], приведен в табл. 1.

**Режимы распыления опытных слитков**

Сила тока, А	350...500
Напряжение на дуге, В	28...34
Скорость вращения, об/мин	3500...5000
Скорость подачи слитка, м/мин	1,0...1,5

Для оценки влияния КЛП на сварочно-технологические характеристики опытных порошковых проволок была проведена наплавка одиночных валиков на режиме:  $I_n = 280...300 A$ ,  $U_d = 26...28 B$ ,  $v_n = 15,0$  м/ч для порошковых проволок ПП-АН170 и ПП-АН170СФ и  $I_n = 170...180 A$ ,  $U_d = 20...21 B$ ,  $v_n = 7,7$  м/ч для порошковых проволок ПП-АН160 и ПП-АН160СФ. Род тока — постоянный, полярность — обратная.

В результате проведенных испытаний (табл. 2) установлено, что использование КЛП в качестве сердечника порошковых проволок повышает стабильность горения дуги (определялась величиной коэффициента вариации по напряжению дуги  $K_v$ : чем меньше величина  $K_v$ , тем стабильнее процесс горения дуги), снижает потери электродного металла от разбрызгивания  $\Psi_p$  и способствует улучшению качества формирования наплавленного металла  $b/h$  (оценивалось величиной отношения ширины  $b$  наплавленного валика к его высоте  $h$ : чем больше величина  $b/h$ , тем выше качество формирования). Сферическая форма частиц КЛП позволила уменьшить диаметр порошковых проволок  $d_{п.п}$  и, тем самым, снизить минимально возможные значения тока и напряжения дуги, при которых процесс наплавки протекает стабильно. Положительное влияние КЛП на  $K_v$ ,  $b/h$  и  $\Psi_p$  обусловлено благоприятным характером их плавления и переноса электродного металла: более равномерным плавлением сердечника и оболочки, уменьшением размера переходящих электродных капель, количества и длительности коротких замыканий дугового промежутка. Наиболее существенные изменения перечисленных параметров имеют место при использовании КЛП в качестве сердечника порошковой проволоки ПП-АН170.

Испытания на абразивную износостойкость металла, наплавленного порошко-

Таблица 3. Химический состав наплавленного металла, мас. %

Тип порошковой проволоки	C	Cr	Si	Mn	Ti	Al	B
ПП-АН160	2,2	0,3	1,2	0,8	0,3	0,2	0,08
ПП-АН160СФ	2,0	0,5	0,8	0,6	0,3	0,1	0,10
ПП-АН170	1,1	18,5	0,7	0,8	0,3	-	2,6
ПП-АН170СФ	0,9	19,1	0,5	0,8	0,4	-	2,9

выми проволоками ПП-АН170 и ПП-АН170СФ, проводили на машине трения НКМ по схеме «неподвижное кольцо» при трении о незакрепленный абразив [3]. Образцы для испытаний размером 16×16×6 мм вырезали из третьего и четвертого слоя многослойной наплавки, проведенной на указанном выше режиме. Химический состав наплавленного металла приведен в табл. 3. Относительную износостойкость оценивали как отношение потери массы образца-эталоны (металл, наплавленный порошковой проволокой ПП-АН170) к потере массы образца, наплавленного порошковой проволокой ПП-АН170СФ. Полученные результаты представлены в табл. 4.

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что использование КЛП в качестве сердечника порошковой проволоки ПП-АН170 приводит к повышению абразивной износостойкости наплавленного металла на 22...32 %. Сравнительный металлографический анализ структур наплавленного металла (рис. 2) показал, что КЛП не оказывает влияние на фазовый состав, но изменяет степень дисперсности и твердость структурных составляющих.

Так, для металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-АН170СФ (рис. 2, б), характерно образование карбоборидов и эвтектики с большей степенью дисперсности, чем для металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-АН170 (рис. 2, а). И в первом, и во втором случае твердость карбоборидов и эвтектики практически одинакова и составляет  $HV_{1,0} = 14000...17000$  и  $HV_{1,0} = 9200...14500$  соответственно. В то же время твердость матрицы металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-АН170СФ, выше, и составляет  $HV_{1,0} = 7200...8600$ , тогда как для металла, наплавленного порошковой проволокой АН170 —  $HV_{1,0} = 6500...7400$ . По всей видимости, более высокая твердость матрицы наплавленного металла обуславливает и большую его абразивную износостойкость.

Определение триботехнических параметров металлов, наплавленных порошковыми проволоками ПП-АН160 и ПП-АН160СФ, проводили на машине трения СМТ-1 по схеме ролик-колодка в соответствии с ГОСТ 23224-86. Колодками служили сегменты из стандартных автомобильных вкладышей АО 20-1. Для изготовления ро-

Таблица 4. Результаты испытаний абразивной износостойкости металла, наплавленного порошковыми проволоками ПП-АН170 и ПП-АН170СФ

Марка образца	Масса образца, г		Износ, г	Относительная износостойкость
	до испытаний	после испытаний		
170-1	12,0436	11,9017	0,1419	1,00
170СФ-1	12,0003	11,8888	0,1115	1,27
170-2	12,4266	12,2736	0,1530	1,00
170СФ-2	11,6245	11,4991	0,1254	1,22
170-3	12,1111	11,9717	0,1394	1,00
170СФ-3	12,2234	12,1176	0,1058	1,32

ликов использовали заготовки из чугуна ВЧ 50-2, цилиндрическую поверхность которых наплавливали опытными порошковыми проволоками на указанных выше режимах, а затем шлифовали до номинальных размеров: толщина 12 мм, диаметр 50 мм. Химический состав испытуемых наплавленных металлов приведен в табл. 3.

Испытания пар трения-скольжения со смазкой проводили в два этапа: в режиме приработки и при рабочей нагрузке. Значение оптимальной рабочей нагрузки  $P_{оп}$  выбирали на основании предварительных экспериментов, показавших, что ее превышение может привести к «заеданию» сопряжения наплавленный металл-вкладыш. Суммарную интенсивность изнашивания сопряжения в целом  $I_{\Sigma}$  определяли как сумму интенсивностей изнашивания вкладыша  $I_k$  и ролика  $I_p$ . Методика определения этих величин приведена в ГОСТ 23.224-86. Кроме того, в процессе испытаний проводили запись изменения коэффициента тре-

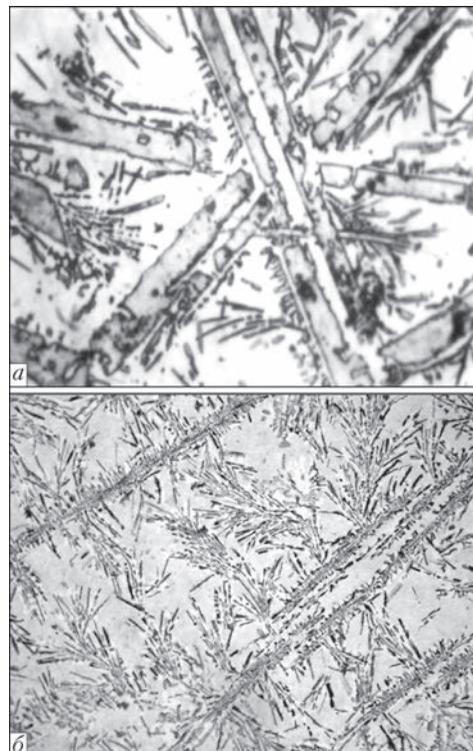


Рис. 2. Структура (×500) металла, наплавленного порошковой проволокой: а — ПП-АН170; б — ПП-АН170СФ

Таблица 5. Триботехнические характеристики пар трения-скольжения

Номер сопряжения	Тип сопряжения и порошковой проволоки	Показатели работоспособности		Интенсивность изнашивания, мм/м · 10 <sup>-4</sup>			$f_{тр} \cdot 10^{-2}$
		$P_{оп}$ , МПа	$T_{тр}$ , °C	$I_p$	$I_k$	$I_{\Sigma}$	
1	Наплавленный металл-вкладыш. Порошковая проволока ПП-АН160	11,0	72	0,24	0,26	0,5	45
2	Наплавленный металл-вкладыш. Порошковая проволока ПП-АН160-СФ	14,0	50	0,22	0,12	0,34	20

ния сопряжения  $f_{тр}$  и температуры фрикционного разогрева масла  $T_{тр}$ .

Из полученных данных (табл. 5) следует, что износостойкость наплавленного металла сопряжений № 1 и 2 примерно одинакова. В то же время  $I_{\Sigma}$  сопряжения № 2 в 1,5 раза ниже, чем сопряжения № 1, что обусловлено меньшей величиной  $I_k$  сопряжения № 2. Исходя из этого, можно утверждать, что для двух сравниваемых сопряжений применение порошковой проволоки ПП-АН160СФ обеспечивает получение наплавленного металла с более высокими антифрикционными свойствами. Для выявления причин, оказывающих влияние на полученные результаты, провели металлографические исследования наплавленного металла сопряжений № 1 и 2. Следует отметить, что детальный анализ струк-

турно-фазового состояния многокомпонентного сплава, кристаллизация которого происходила в неравновесных условиях, весьма трудоемкая задача. Однако с достаточной степенью достоверности можно утверждать, что структура наплавленного металла (при использовании как порошковой проволоки ПП-АН160, так и ПП-АН160СФ) состоит из двух основных фаз: продуктов распада аустенита (перлит + остаточный аустенит) и карбидно-цементитной фазы (рис. 3). Последняя в плоскости шлифа имеет вид разветвленной армирующей сетки с разнотолщинными участками.

На фотоснимке микроструктуры эта фаза окрашена в белый цвет, а перлитно-аустенитная — в темный, что дало возможность провести оценку их количественного соотношения. В результате установлено, что наплавленный металл сопряжения № 1 содержит 40...46 % «белой» (карбидно-цементитной) фазы твердостью  $HV0,5$  — 8000...8200. Твердость зерен твердого раствора составляет  $HV0,5$  — 5000...5200. В наплавленном металле сопряжения № 2 доля карбидно-цементитной фазы составляет 28...33 %, а ее твердость остается такой же, что и в наплавленном металле сопряжения № 1. В то же время твердость перлита наплавленного металла сопряжения № 2 ( $HV0,5$  — 5800...6200) существенно выше, чем у наплавленного металла сопряжения № 1.

Таким образом можно утверждать, что уменьшение доли твердой, и абразивной по отношению к вкладышу, карбидной фазы в наплавленном металле способствует снижению интенсивности изнашивания вкладыша и сопряжения в целом. В то же время уменьшение количества износостойкой структурной составляющей компенсируется увеличением твердости и количества твердого раствора. В результате интенсивности изнашивания наплавленного металла сопряжений № 1 и 2 остаются примерно одинаковыми. Выявить механизм влияния КЛП на количественное соотношение фаз в наплавленном металле и их твердость с помощью металлографического анализа не представилось возможным. Однако можно предположить, что это связано с влиянием бора — активного модифицирующего и карбидообразующего элемента.

В работе [4] показано, что вид борсодержащего материала ( $B_4C$ ,  $B_2O_3$ , BN и др.) в составе сердечника порошковой проволоки оказывает суще-

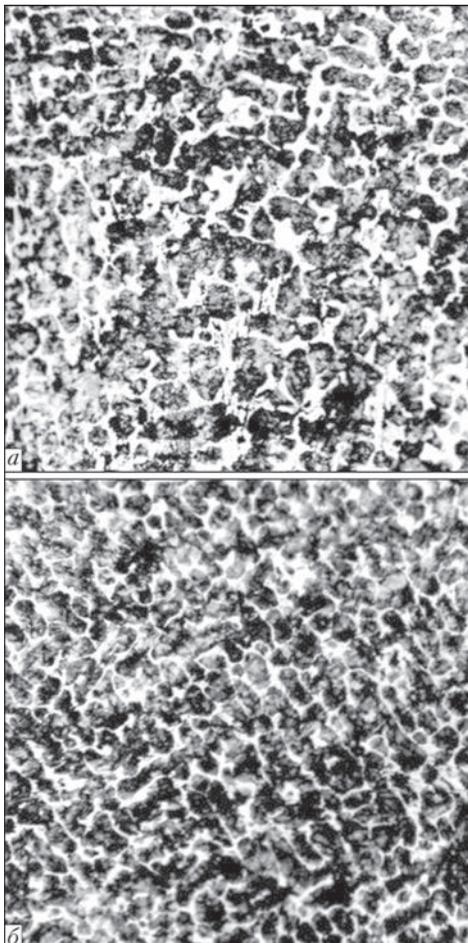


Рис. 3. Структура (×320) металла, наплавленного порошковой проволокой: а — ПП-АН160; б — ПП-АН160СФ

ственное влияние на количественное соотношение и морфологию фазовых составляющих наплавленного металла. Бор в состав сердечников порошковых проволок ПП-АН160 и ПП-АН160СФ был введен хотя и в одинаковых количествах, но с помощью разных борсодержащих материалов: в первом случае — лигатуры железо–хром–бор (ФХБ), во втором — частиц КЛП. Возможно также, что различное содержание карбидно-цементитной фазы в исследованных образцах наплавленного металла является результатом изменяющейся карбидообразующей активности бора, зависящей от его композиционного состояния.

### Выводы

1. Применение комплексно-легированных порошков (КЛП) в качестве сердечника высоколегированных порошковых проволок позволяет существенно уменьшить ее диаметр без изменения уровня легирования, снизить энергоемкость процесса наплавки и улучшить эксплуатационные свойства наплавленного металла. Замена сердечника порошковой проволоки ПП-АН170 на сердечник из КЛП позволило повысить ее сварочно-технологические характеристики, уменьшить диаметр с 3,2 до 2,6 мм и в

1,2...1,3 раза увеличить абразивную износостойкость наплавленного металла.

2. Замена механической смеси неоднородных по составу шихтовых материалов сердечника порошковой проволоки на КЛП оказывает влияние на количественный состав и твердость структурных составляющих наплавленного металла. Применение КЛП в порошковой проволоке ПП-АН160 уменьшает долю абразивной карбидной фазы и повышает твердость перлитной основы наплавленного металла, что увеличивает износостойкость сопряжения, работающего в условиях трения металла по металлу в 1,3 раза.

1. *Кондратьев И. А.* Порошковая проволока, заполненная гранулированным сплавом // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка деталей оборудования металлургии и энергетики. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1980. — С. 36–38.
2. *Дзыкович В. И.* Исследование и разработка материалов для износостойкой наплавки на основе сфероидизированных гранул карбидов вольфрама: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 2010. — 24с.
3. *Юзвенко Ю. А., Гавриш В. А., Марьенко В. Ю.* Лабораторные установки для оценки износостойкости наплавленного металла // Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1979. — С. 23–27.
4. *Жудра А. П., Кривчилов С. Ю., Петров В. В.* К вопросу выбора борсодержащих шихтовых материалов для сердечника порошковой проволоки // Автомат. сварка. — 2004. — № 4. — С. 55–56.

Поступила в редакцию 22.09.2014

## 15-й Международный научно-технический семинар «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА И РЕМОНТА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НА ТРАНСПОРТЕ»

23–27 февраля 2015

г. Свалява

### Тематика семинара:

- ◆ Современные тенденции развития технологии машиностроения
- ◆ Подготовка производства — как основа создания конкурентоспособной продукции
- ◆ Состояние и перспективы развития заготовительного производства
- ◆ Совершенствование технологий механической и физико-технической обработки в машино- и приборостроении
- ◆ Упрочняющие технологии и покрытия
- ◆ Современные технологии и оборудование в сборочном и сварочном производстве
- ◆ Ремонт и восстановление деталей машин в промышленности и на транспорте, оборудование для изготовления, ремонта и восстановления
- ◆ Технологическое управление качеством и эксплуатационными свойствами изделий
- ◆ Метрология, технический контроль и диагностика в машино- и приборостроении
- ◆ Экологические проблемы и их решения в современном производстве

В рамках семинара будет проведена презентация журналов издательства «Машиностроение» (Россия), разработок НИИ и промышленных предприятий

На ПАО «Ильницкий завод механического сварочного оборудования» будет проведено выездное заседание секции

**«Современное сварочно-наплавочное и механическое сварочное оборудование»**

Оргкомитет приглашает принять участие в семинаре, выступить с докладами и сообщениями, представить выставочный стенд или образцы продукции.



УДК 621.791.927.55

## МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ УСТАНОВКИ А1756

Е. Ф. ПЕРЕПЛЕТЧИКОВ, И. А. РЯБЦЕВ, Ю. Н. ЛАНКИН, В. Ф. СЕМИКИН, П. П. ОСЕЧКОВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Приведены результаты модернизации системы управления установки А1756 для плазменно-порошковой наплавки. Новая система управления позволяет полностью автоматизировать процесс наплавки, а также оптимизировать расход присадочного порошка и минимизировать его потери. Управление процессом наплавки производится с помощью программатора, выполненного с применением микроконтроллера PIC16F886 (Microchip) и алфавитно-цифрового OLED индикатора WEN1601A (Winstar). Микропроцессорный блок программатора позволяет задавать параметры временных характеристик тока наплавки и расхода порошка и их отработку в процессе программного управления. Разработана и смонтирована схема подключения программатора к установке А1756 с возможностью переключения работы как от программатора, так и в обычном штатном режиме. Программатор позволяет проводить настройку режимов, обеспечивающих хорошее формирование наплавленных валиков, при автоматической плазменно-порошковой наплавке, качественную заварку кратера и минимальные потери присадочного порошка. Библиогр. 2, рис. 7.

*Ключевые слова:* плазменно-порошковая наплавка, установка для наплавки, система управления, расход порошка, режимы наплавки, программатор

При плазменно-порошковой наплавке характеристики переноса и плавления присадочного материала напрямую не связаны с током и напряжением дуги и во многом определяются массовой скоростью подачи и фракционным составом присадочного порошка, а также его физическими свойствами. Учитывая тот факт, что при плазменно-порошковой наплавке в качестве присадочных материалов в основном используются дорогостоящие порошки сплавов на основе никеля и кобальта, а также специальные наплавочные сплавы на основе железа, важной проблемой является оптимизация расхода порошка и минимизация его потерь при этом способе наплавки [1].

Расход порошка и его потери зависят от конструкции некоторых узлов наплавочного оборудования (питатель порошка, плазматрон), режимов наплавки и, в некоторой степени, конструкции наплавляемой детали (геометрических характеристик наплавляемой поверхности). В частности, потери порошка возрастают, если плазматрон располагается или периодически подходит близко к кромке наплавляемой детали, а также, если ширина наплавляемой подложки меньше диаметра сопла.

На рис. 1 показана схема барабанного питателя, разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона [2]. Питатель состоит из герметичного корпуса 1, бункера 6 с патрубком, барабана 2 и механизма настраиваемой втулки 4, перемещаемой по патрубку при помощи рычажно-винтового регулятора 3. Устройство 5 позволяет контролировать уровень порошка в

питателе. Барабан приводится во вращение двигателем постоянного тока через червячный редуктор (на рис. 1 не показаны). Зазор между втулкой 4 и барабаном устанавливается таким, чтобы при неподвижном барабане порошок не высыпался из бункера. Вращаясь, барабан увлекает порошок за собой и направляет его в приемную воронку, откуда порошок по трубке 7 переносится транспортирующим газом в плазматрон. Регулируя скорость вращения барабана, можно изменять скорость по-

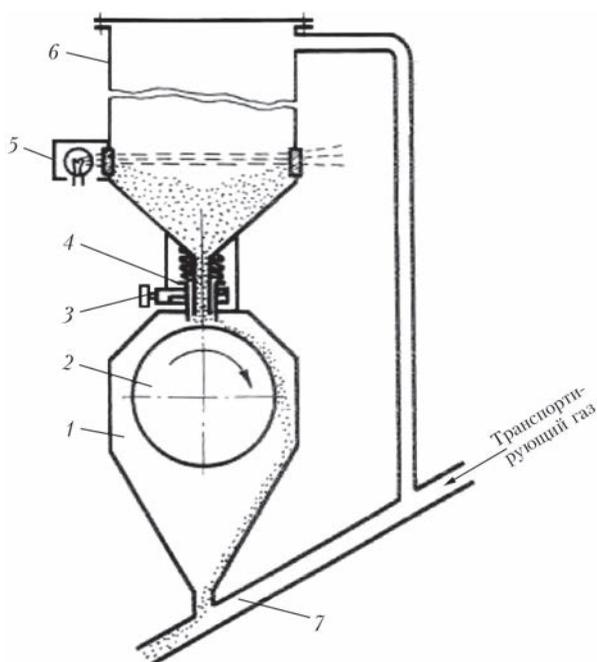


Рис. 1. Схема барабанного питателя для подачи присадочного порошка (обозначения см. в тексте)

© Е. Ф. Переpletчиков, И. А. Рябцев, Ю. Н. Ланкин, В. Ф. Семикин, П. П. Осечков, 2014

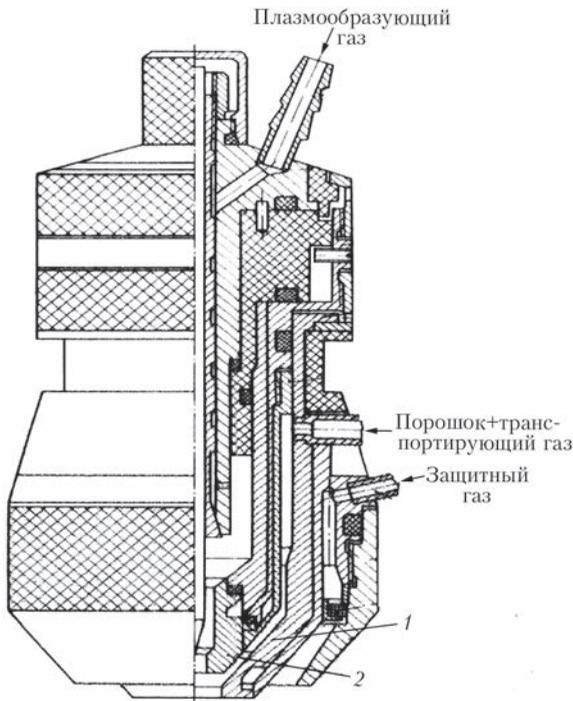


Рис. 2. Плазматрон А1756.05 для плазменно-порошковой наплавки: 1 — фокусирующее; 2 — плазмообразующее сопла подачи присадочного порошка в плазматрон (рис. 2). Транспортирующим газом присадочный порошок подается в зазор между фокусирующим 1 и плазмообразующим 2 соплами.

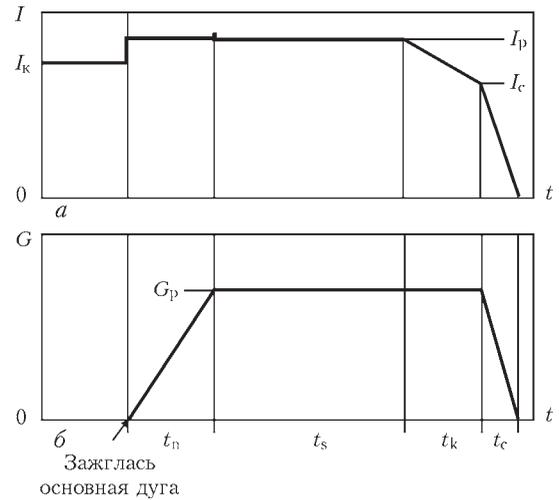


Рис. 4. Циклограмма процесса плазменно-порошковой наплавки: а — ток наплавки; б — расход порошка ( $I_k$  — ток косвенной;  $I_p$  — ток основной дуги;  $I_c$  — ток в момент начала спада скорости подачи порошка;  $G_p$  — максимальный уровень расхода (скорости подачи) порошка;  $t_n$  — длительность нарастания;  $t_s$  — длительность выдержки при установившемся процессе;  $t_k$  — длительность коррекции;  $t_c$  — длительность спада)

В плазматроне предусмотрено четыре варианта сочетания диаметров плазмообразующего и фокусирующего сопел  $d_{пл} + d_{ф}$ : 2,0 + 4,0; 3,0 + 6,0; 4,0 + 7,5; 5,0 + 9,0 мм, что также позволяет регулировать скорость подачи порошка. Выбор оптимального сочетания диаметров сопел определяется требованиями технологии наплавки [1].

Из параметров режимов наплавки на расход и потери присадочного порошка, главным образом, влияет сила тока наплавки и расход транспорти-

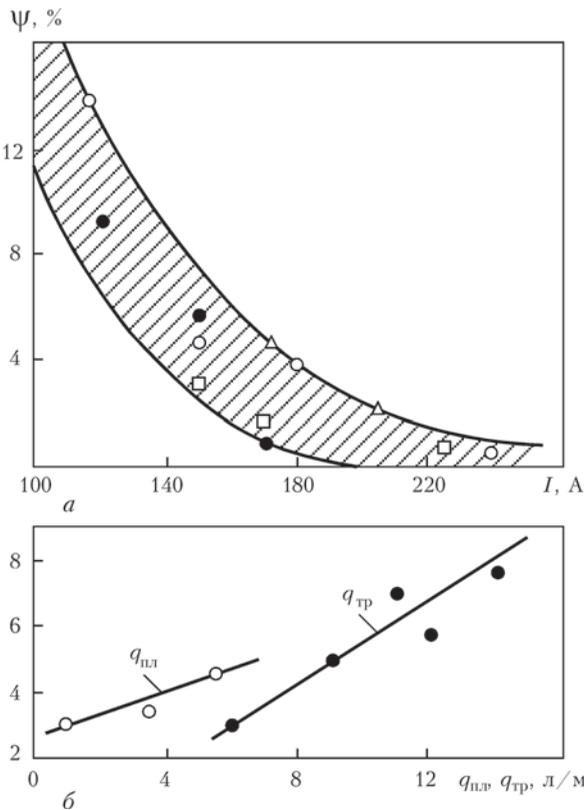


Рис. 3. Зависимость коэффициента потерь порошка  $\psi$  от тока наплавки  $I$  (а) и расхода плазмообразующего  $q_{пл}$  и транспортирующего  $q_{тр}$  газов [1] (б); а — подача порошка: ● — 1,2; ○ — 2,0; □ — 3,5; △ — 6 кг/ч; б — 2 кг/ч

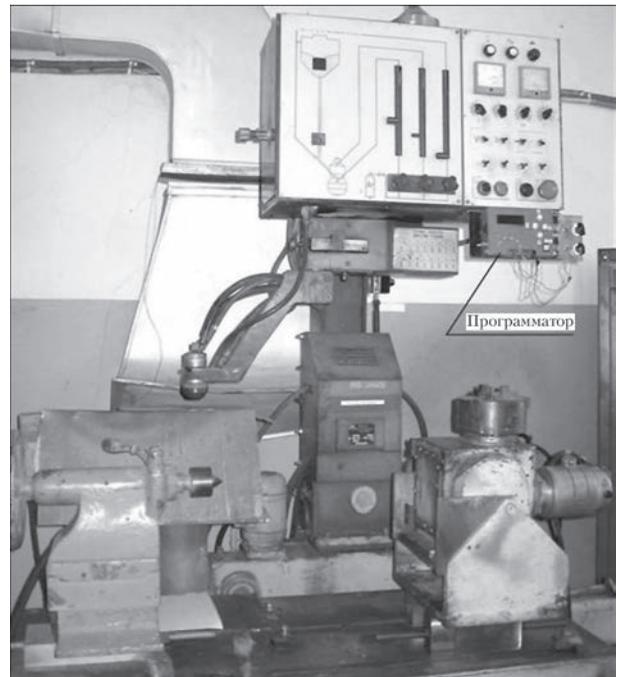


Рис. 5. Внешний вид установки плазменно-порошковой наплавки А1756 с программатором управления процессом наплавки



рующего газа (рис. 3) [1]. Увеличение силы тока наплавки снижает потери присадочного порошка во всем диапазоне скоростей его подачи (рис. 3, а), так как большее количество порошка может расплавиться как в дуге, так и в сварочной ванне.

При малом расходе транспортирующего газа (3...4 л/мин) процесс наплавки часто нарушается вследствие забивания каналов плазматрона. С увеличением расхода транспортирующего газа растут потери порошка (рис. 3, б) вследствие повышения начальной скорости частиц и ухудшения условий их нагрева в дуге.

При этом, как показывает опыт, не все частицы порошка, движущиеся по периферии столба дуги, попадают в сварочную ванну. Те из них, которые попадают на наплавляемую поверхность впереди или сбоку сварочной ванны, в результате упругого отскока от этой поверхности безвозвратно теряются. Оптимальным считается расход транспортирующего газа в пределах 6...9 л/мин, при котором потери порошка не превышают 5...8 %.

Кроме этих потерь, определяемых технологическими особенностями установившегося процесса плазменно-порошковой наплавки, есть потери порошка в начале и при окончании процесса наплавки, которые трудно оптимизировать и контролировать. Теоретически циклограмму всего процесса плазменно-порошковой наплавки можно представить следующим образом (рис. 4).

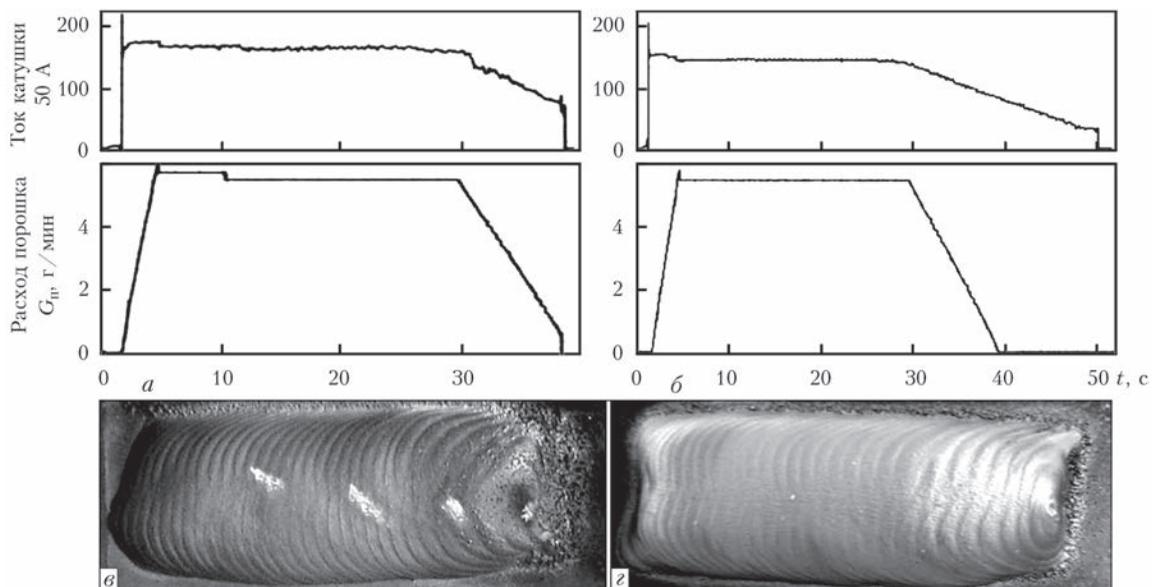


Рис. 7. Временные характеристики технологических параметров наплавки (а, б) и валики, наплавленные на этих режимах (в, з): а, в — ток и подача порошка отключены одновременно; б, з — подача порошка прекращена до отключения тока

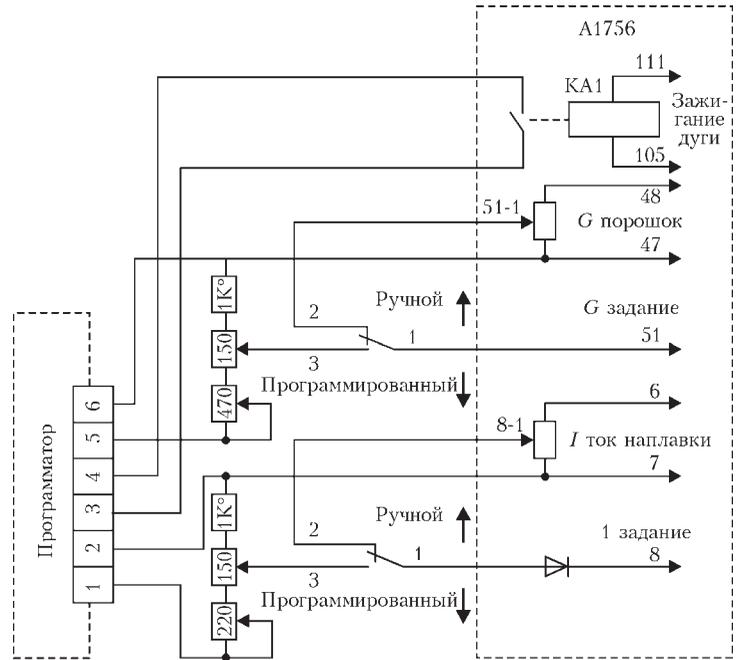


Рис. 6. Принципиальная схема программатора

Присадочный порошок необходимо начать подавать после того, как зажглась основная дуга (рис. 4, б). Подача порошка увеличивается за время  $t_n$  до заданного технологией значения  $G_p$ . При окончании процесса наплавки необходимо произвести заварку кратера с постепенным синхронным снижением тока наплавки и скорости подачи порошка.

Для управления процессом плазменно-порошковой наплавки в ИЭС им. Е. О. Патона разработан программатор, выполненный с применением микроконтроллера PIC16F886 (Microchip) и алфавитно-цифрового OLED индикатора WEN1601A (Winstar). Микропроцессорный блок программатора позволяет задавать параметры

временных характеристик тока наплавки и расхода порошка на установке плазменно-порошковой наплавки А1756 (рис. 5) и их отработку в процессе программного управления.

Разработаны принципиальные схемы, печатные платы, конструкция и программное обеспечение программатора. Программное обеспечение адаптировано под технологические условия установки А1756:

– технологические параметры задаются в натуральных величинах (ток наплавки в А, расход порошка в г/мин);

– введены технологические границы задания параметров временных характеристик 0...250 А, 0...120 г/мин.

Разработана и смонтирована схема подключения программатора к установке А1756 с возможностью переключения работы как от программатора, так и в обычном штатном режиме (рис. 6).

Проведены широкие технологические испытания программатора на установке А1756 с записью основных параметров режима наплавки — тока и подачи порошка. Ставили задачу разработки таких режимов наплавки, которые обеспечивали бы минимальные потери порошка и качественное

формирование наплавленных валиков, в том числе качественную заварку кратера.

Если ток отключается одновременно или раньше, чем прекращается подача порошка — это ведет к плохой заварке кратера и излишней потере порошка (рис. 7, а, в).

В том случае, если подача порошка прекращается раньше, чем выключается ток, обеспечивается качественная заварка кратера, а потери порошка сводятся к минимуму (рис. 7, б, г). По времени начало спада тока и подачи порошка совпадают, однако подача порошка прекращается несколько раньше (рис. 7, б).

Таким образом, разработанный программатор позволяет производить настройку режимов, обеспечивающих хорошее формирование наплавленных валиков, при автоматической плазменно-порошковой наплавке на установке А1756, качественную заварку кратера и минимальные потери присадочного порошка.

1. Гладкий П. В., Переpletчиков Е. Ф., Рябцев И. А. Плазменная наплавка. — Киев: Екотехнологія, 2007. — 292 с.
2. А. с. 266111 21h 30/17 СССР. Питатель барабанного типа /П. В. Гладкий, Е. Ф. Переpletчиков, Ю. И. Сапрыкин и др. // Открытия. Изобрет. — 1970. — № 11. — С. 76.

Поступила в редакцию 22.09.2014

**3 – 5.03.2015**

Przemysłowa wiosna w Expo Silesia – jedyne w kraju tego typu specjalistyczne spotkania branżowe  
 Промышленная весна в Expo Silesia – единственные в Польше этого типа профессиональные отраслевые встречи

**Targi Techniki Laserowej**  
 •••••  
 Wyставка лазерной техники  
[www.lasexpo.pl](http://www.lasexpo.pl)

**Targi Technologii Cięcia**  
 •••••  
 Wyставка технологий резки  
[www.expo-cutting.pl](http://www.expo-cutting.pl)

**kontakt: / Контакт:**  
 tel. +48 32 78 87 541 e-mail: laserexpo@exposilesia.pl  
 tel. +48 32 78 87 538 expocutting@exposilesia.pl  
 tel. +48 32 78 87 514 grindexpo@exposilesia.pl  
 tel. +48 32 78 87 506 fxingtechexpo@exposilesia.pl  
 fax +48 32 78 87 522

**Контакты:**

тел./факс: (38044) 200-82-77; 200-54-84

E-mail: journal@paton.kiev.ua

Подписано к печати 27.11.2014. Формат 60×84/8. Офсетная печать.  
 Усл. печ. л. 17,09. Усл.-отг. 18,2. Уч.-изд. л. 20,00 + 2 цв. вклейки.  
 Печать ООО «Фирма «Эссе».  
 03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.



**Межотраслевой учебно-аттестационный центр  
Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины**



**Программы профессиональной подготовки на 2015 г.**

Шифр курса	Наименование программы	Продолжительность	Сроки проведения	
<b>1. Повышение квалификации инженерно-технических работников</b> (с аттестацией на право технического руководства сварочными работами при изготовлении сварных конструкций в т.ч. подведомственных государственным надзорным органам)				
101	Техническое руководство сварочными работами на объектах, за которыми осуществляется государственный надзор	подготовка и аттестация	3 недели (112 ч)	
102		переаттестация	18 ч	
103	Расширение области аттестации руководителей сварочных работ		6 ч	
104	Техническое руководство сварочно-монтажными работами при строительстве и ремонте газопроводов из полиэтиленовых труб	подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	
105		переаттестация	1 неделя (32 ч)	
106	Техническое руководство сварочными работами при ремонте действующих трубопроводов (под давлением)	подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	
107		переаттестация	22 ч	
109	Техническое руководство работами по контактной стыковой сварке железнодорожных рельсов.	72 ч	март	
111	Подготовка и аттестация председателей комиссий по аттестации сварщиков - экспертов Украинского аттестационного комитета сварщиков (УАКС)	3 недели (112 ч)	декабрь	
112	Расширение области аттестации председателей комиссий по аттестации сварщиков – экспертов УАКС	8 ч	май, декабрь	
113	Подготовка и аттестация членов комиссий по аттестации сварщиков:	специалистов технологических служб, отвечающих за организацию аттестации сварщиков	2 недели (72 ч)	
114		специалистов служб технического контроля, отвечающих за контроль сварных соединений (включая специальную подготовку к аттестации по визуально-оптическому методу контроля)	2 недели (74 ч)	
115		специалистов служб охраны труда предприятий	2 недели (74 ч)	
116	Расширение области аттестации членов комиссий по аттестации сварщиков – специалистов технологических служб по сварке		6 ч	
117	Подтверждение полномочий (переаттестация) председателей комиссий по аттестации сварщиков - экспертов УАКС:	со стажем 3 года	32 ч	
118		со стажем 6 и более лет	20 ч	
119	Подтверждение полномочий (переаттестация) членов комиссий по аттестации сварщиков:	специалистов технологических служб по сварке:	со стажем 3 года	
120			со стажем 6 и более лет	
121		специалистов по техническому контролю	16 ч	
122		специалистов по техническому контролю (включая спец. подготовку к аттестации по визуально-оптическому методу контроля)	36 ч	
123		специалистов по охране труда	16 ч	
130	Переподготовка специалистов сварочного производства по программам Международного института сварки с присвоением квалификации:	Международный инженер по сварке	453 / 126 ч <sup>1</sup>	
132		Международный технолог по сварке	372 / 91 ч <sup>1</sup>	
134		Международный специалист по сварке	248 / 60 ч <sup>1</sup>	
135		Международный практик по сварке	114	
136		Международный инспектор по сварке	полного уровня	230 ч
137			стандартного уровня	170 ч
138			базового уровня	115 ч
139, 149	для специалистов, которые имеют квалификацию «Международный инженер по сварке»		76/ 78	
141	Металлографические исследования металлов и сварных соединений	подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	
142		переаттестация	22 ч	
143	Физико-механические испытания материалов и сварных соединений	повышение квалификации и аттестация	2 недели (72 ч)	
144		переаттестация	20 ч	
145	Эмиссионный спектральный анализ (стилюскопирование) металлов и сплавов	подготовка и аттестация	2 недели (74 ч)	
146		переаттестация	22 ч	
147	Повышение квалификации руководителей и специалистов рельсосварочных поездов	36 ч	июнь	
151	Производство сварочных материалов: организация, технологии и системы управления качеством	2 недели (72 ч)	по согласованию с заказчиком	
152	Ремонт, восстановление и упрочнение изношенных деталей методами наплавки			
<b>Тематические семинары</b> (возможно проведение на территории заказчика)				
161	Состояние нормативно-технической документации в области сварочного производства, тенденции и перспективы	2 дня (16 ч)	март, июнь	

162	Обеспечение качества сварки. Требования национальных и международных стандартов	2 дня (16 ч)	апрель, июнь, октябрь
163	Современное оборудование и состояние нормативной документации в области сварки труб из термoplastов	1 день (8ч)	по согласованию с заказчиком
164	Подтверждение соответствия, декларирование продукции сварочного производства		
165	Новые технологии профессиональной подготовки сварщиков и дефектоскопистов		сентябрь, октябрь

## 2. Повышение квалификации педагогических работников системы профессионально-технического образования в области сварки

201	Организация профессионально-практической подготовки сварщиков по модульной технологии	3 недели (112 ч)	постоянно, по согласованию с заказчиком
202	Организация профессионально-теоретической подготовки сварщиков по модульной технологии	2 недели (72 ч)	
203	Повышение квалификации мастеров (инструкторов) производственного обучения по сварке с присвоением квалификации «Международный практик по сварке (IWP)»	4 недели (152 ч)	
204	Повышение квалификации преподавателей специальных дисциплин профессионально-технических учебных заведений по направлению «Сварка» с присвоением квалификации «Международный специалист по сварке»	2,5 недели (100 ч)	
206	Повышение квалификации мастеров производственного обучения по сварке с присвоением квалификации «Международный практик по сварке (IWP)»	186 ч	

## 3. Профессиональная подготовка, переподготовка и повышение квалификации квалифицированных рабочих в области сварки и родственных технологий (с присвоением квалификации в соответствии с национальными и международными требованиями)

### Курсовая подготовка СВАРЩИКОВ:

301	ручной дуговой сварки покрытыми электродами	9 недель (352 ч)	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)
302	ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах (TIG)	5 недель (192 ч)	
303	газовой сварки	3 недели (116 ч)	
304	механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG)	3 недели (112 ч)	
305	механизированной дуговой сварки порошковой проволокой	3 недели (112 ч)	
306	автоматической дуговой сварки под флюсом	3 недели (112 ч)	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком
307	электрошлаковой сварки	3 недели (112 ч)	
308	контактной (прессовой) сварки (рельсов, промышленных и магистральных нефте- и газопроводов)	3 недели (112 ч)	
309	пластмасс (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб)	5 недель (196 ч)	

### Подготовка сварщиков по программам Международного института сварки с присвоением квалификации:

310	Международный сварщик угловых швов	72 - 230 ч <sup>1</sup>	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)
312	Международный сварщик плоских соединений	72 - 360 ч <sup>1</sup>	
315	Международный сварщик труб	72 - 560 ч <sup>1</sup>	
318	Международный практик-сварщик	35 - 153 ч <sup>1</sup>	

### Курсовая переподготовка СВАРЩИКОВ:

320, 321	ручной дуговой сварки покрытыми электродами	152 / 76 ч <sup>2</sup>	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)
322	ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах	76 ч / 112 ч / 152 ч	
325	газовой сварки	76 ч	
326	механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG)	72 ч	
327	механизированной дуговой сварки порошковой проволокой	76 ч	
328	автоматической дуговой сварки под флюсом	76 ч	по согласованию с заказчиком
329	электрошлаковой сварки	76 ч	

### Повышение квалификации СВАРЩИКОВ:

330	ручной дуговой сварки покрытыми электродами	2 недели (72 ч)	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)
331	ручной дуговой сварки неплавящимся электродом в инертных газах	2 недели (72 ч)	
332	газовой сварки	2 недели (72 ч)	
333	механизированной дуговой сварки плавящимся металлическим электродом в защитных газах (MIG/MAG)	2 недели (72 ч)	
334	механизированной дуговой сварки порошковой проволокой	2 недели (72 ч)	
335	автоматической дуговой сварки под флюсом	2 недели (72 ч)	по согласованию с заказчиком
336	электрошлаковой сварки	2 недели (72 ч)	

### Курсовая подготовка дефектоскопистов и контролеров:

340	ультразвукового контроля	196 ч	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком
341	рентген и гамма контроля	188 ч	
342	магнитного контроля	180 ч	
343	контролеров неразрушающего контроля	196 / 72 ч <sup>3</sup>	
345	контролеров сварочных работ	154 ч	

### Целевая курсовая подготовка дефектоскопистов для железнодорожного транспорта:

350	магнитного контроля	120 ч	по согласованию с заказчиком
351	ультразвукового контроля	160 ч	

352	по комплексному ультразвуковому контролю колесных пар вагонов	160 ч	по согласованию с заказчиком
<b>Целевая подготовка и подтверждение квалификации:</b>			
362	метализаторов по нанесению упрочняющих и защитных покрытий на металлы	электродуговым напылением	3 недели (112 ч)
363		газопламенным напылением	3 недели (112 ч)
364		детонационным напылением	3 недели (112 ч)
365		плазменным напылением	3 недели (112 ч)
366	специалистов Укрзалізниці по поверхностной закалке колесных пар на установке высокотемпературной закалки УВПЗ - 2М»	72 ч	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком

#### 4. Аттестация персонала сварочного производства

401	Специальная подготовка и аттестация сварщиков в соответствии с правилами Госгорпромнадзора (НПАОП 0.00-1.16-96) и стандартами ДСТУ 2944, ДСТУ ISO 9606-2,3,4,5		72 ч	постоянно
402	Дополнительная и внеочередная аттестация сварщиков согласно с НПАОП 0.00-1.16-96		24 ч	
403	Периодическая аттестация сварщиков в соответствии с НПАОП 0.00-1.16-96, ДСТУ 2944, ДСТУ ISO 9606-2,3,4,5		32 ч	
404	Специальная подготовка и аттестация сварщиков в соответствии с международными (европейскими) стандартами EN ISO 9606-1 (EN 287-1)		112 ч <sup>2</sup>	
405			72 ч <sup>2</sup>	
406, 457	Периодическая аттестация сварщиков в соответствии с международными (европейскими) стандартами EN ISO 9606-1 (EN 287-1)		24 ч	по согласованию с заказчиком
407	Специальная подготовка и аттестация операторов автоматической сварки плавлением в соответствии с стандартом ISO 14732		2 недели (72 ч)	
411	Специальная подготовка и аттестация сварщиков на допуск к выполнению сварочных работ при ремонте действующих магистральных трубопроводов (под давлением)		3 недели (112 ч)	
412	Периодическая аттестация сварщиков на допуск к выполнению сварочных работ при ремонте действующих магистральных трубопроводов (под давлением)		32 ч	
413	Специальная подготовка и аттестация операторов-сварщиков контактно-стыковой сварки арматуры		2 недели (72 ч)	проводится по окончании курса 309
414	Аттестация сварщиков пластмасс (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб)			
415	Периодическая аттестация сварщиков пластмасс (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб)		32 ч	ежеквартально
421	Специальная подготовка дефектоскопистов к сертификации согласно НПАОП 0.00-1.63-13	ультразвуковой контроль	32 / 36 / 64 (I yr) ч <sup>4</sup>	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком
423			40 / 48 / 72 / 80 / 144 (II yr) ч <sup>4</sup>	
427		радиографический контроль	36 / 40 / 72 (I yr) ч <sup>4</sup>	
430			40 / 48 / 76 / 80 / 152 (II yr) ч <sup>4</sup>	
433			16 / 20 / 30 (I yr) ч <sup>4</sup>	
436	визуально-оптический контроль	20 / 24 / 35 / 40 / 70 (II yr) ч <sup>4</sup>		
441	Специальная подготовка и аттестация дефектоскопистов по комплексному ультразвуковому контролю колесных пар вагонов (согласно РД 07-09-97)	подготовка и аттестация	76 ч	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком
442		переаттестация	36 ч	
443	Специальная подготовка и специалистов по контролю качества защитных покрытий	подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	
444		переаттестация	32 ч	
448	Переаттестация сварщиков контактной стыковой сварки железнодорожных рельсов согласно требованиям ДСТУ ISO 14732		32 ч	февраль
454	Специальная подготовка и аттестация газорезчиков	газовой резки	3 недели (112 ч)	по согласованию с заказчиком
455		ручной и механизированной воздушно-плазменной резки	3 недели (112 ч)	

#### 5. Тренинги, тестирование и подтверждение квалификации

501	Профессиональное тестирование и подтверждение квалификации сварщиков ручной и механизированной дуговой сварки	4 – 8 ч <sup>5</sup>	по согласованию с заказчиком
505	Профессиональное тестирование и подтверждение квалификации сварщиков ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах	4 – 16 ч <sup>5</sup>	
510	Практические тренинги по различным способам сварки	16 – 32 ч <sup>5</sup>	

<sup>1</sup> - Продолжительность обучения определяется в зависимости от базовой профессиональной подготовки, опыта работы в сварочном производстве, выбранного процесса и группы материалов (для сварщиков).

<sup>2</sup> - Продолжительность обучения зависит от специализации и уровня квалификации.

<sup>3</sup> - Длительность программы определяется по результатам входного тестирования.

<sup>4</sup> - Продолжительность обучения указывается в направлении ОСП (орган по сертификации персонала).

<sup>5</sup> - Длительность программы зависит от условий и характера испытаний.

По просьбе заказчиков возможно проведение обучения по другим программам, не вошедшим в данный перечень. На период обучения слушателям предоставляется жилье с оплатой за наличный расчет. Стоимость обучения определяется при заключении договора. Для приема на обучение необходимо направить заявку с указанием шифра курса, количества специалистов и почтовых реквизитов предприятия.

Украина, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11 Тел. (044) 456-63-30, 456-10-74, 200-82-80, 200-81-09, Факс (044) 456-48-94; E-mail: paton\_muac@ukr.net, http://muac.kpi.ua

## ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ-СВАРЩИКОВ КАЗАХСТАНА В УКРАИНЕ

Одной из тенденций современного промышленного производства является переход на международные нормы и стандарты. Это существенно расширяет возможности сотрудничества предприятий с зарубежными партнерами в плане подтверждения соответствия продукции установленным требованиям. Особенно такие тенденции характерны для сварочного производства, эффективность которого в значительной степени определяется качеством профессиональной компетентности персонала.

Профессиональная подготовка персонала, способного реализовать преимущества современных сварочных технологий, имеет свои особенности, которые связаны со спецификой процесса сварки и высокими требованиями к качеству сварных конструкций. Эти особенности реализованы в учебных программах Международного института сварки, на базе которых функционирует международная система подготовки и квалификации персонала всех категорий, начиная с рабочих-сварщиков и заканчивая дипломированными инженерами по сварке. Благодаря использованию единых учебных программ и стандартизованных квалификационных испытаний, присвоенные квалификации в области сварки признаются в разных странах.

В настоящее время подготовку персонала сварочного производства в рамках международной квалификационной системы проводят аккредитованные Международным институтом сварки Уполномоченные национальные органы (АНВ), одним из которых является Межотраслевой Учебно-аттестационный центр Института электросварки им. Е.О.Патона. С 1998 г. Центр является активным участником международных программ и зарекомендовал себя надежным партнером как в Украине, так и за рубежом. Подготовленные им специалисты успешно работают во многих странах.

В апреле 2014 г. согласно заявке компании «Transcargio International Limited», принимающей участие в Государственной Программе форсиро-



В нижнем ряду преподаватели МУАЦ: Г.Е. Саксонов, канд. техн. наук Е.П. Чвертко, канд. техн. наук, директор МУАЦ П.П. Проценко

ванного индустриально-инновационного развития Республики Казахстан, на обучение по программе «Международный сварщик» была принята группа слушателей из девяти граждан Казахстана. В ходе 16-недельного обучения они прошли полный курс профессионально-теоретической и практической подготовки, предусмотренной программой Международного института сварки. Освоили технику ручной дуговой сварки покрытыми электродами различных соединений плоских деталей и труб из конструкционных сталей. По результатам квалификационных испытаний, включающих проверку теоретических знаний и практических навыков, экзаменационная комиссия центра присвоила квалификацию Международного сварщика труб — пяти слушателям и Международного сварщика пластин — четырем слушателям.

Руководство компании «Transcargio International Limited» отметило хороший уровень организации теоретического и практического обучения, высокую квалификацию преподавателей и мастеров производственного обучения, качество методического обеспечения учебного процесса и выразило готовность продолжить сотрудничество в области профессионального обучения персонала и по другим международным квалификациям.

П.П. Проценко

## 56-я Международная конференция «СВАРКА — ВСЕГДА МОЖЕТ БОЛЬШЕ»

15–16 октября 2014 г. в г. Сосновице (Польша) была проведена 56-я Международная конференция «Сварка – всегда может больше». Конференция была организована Институтом сварки Польши и проходила в выставочном комплексе «ExpoSilesia» в рамках Международной специализированной выставки ExpoWelding.

**Конференция «Сварка — всегда может больше».** В работе конференции приняло участие более 350 человек, в т. ч. 70 сотрудников Института сварки Польши. Было представлено 27 докладов по современным проблемам сварки специалистами из Польши (15 докладов), Австрии (1 доклад), Болгарии (1 доклад), Германии (3 доклада), Португалии (1 доклад), Словакии (1 доклад), Украины (3 доклада) и Швеции (2 доклада). К началу конференции пленарные доклады были изданы в специальном выпуске журнала «Biuletyn Instytutu Spawalnictwa» № 5, 2014.

Отметим некоторые из докладов.

– *Ф. Насцименто, Л. Куинтино* «Развитие технологии сварки трением с перемешиванием – FSW». В докладе рассматривается технология FSW при сварке элементов электротрансформаторов, в которых медь заменена алюминием. Перспективной является технология модифицирования поверхности с помощью трения, т. к. позволяет повышать механические свойства поверхности материала. Применение модифицирования трением, в том числе с использованием присадочного материала приводит к повышению износостойкости и антикоррозионных свойств. Выполнение каналов с помощью способа трения, называемого FSC (Friction Stir Channelling), является новой технологией, которая может найти широкое применение при изготовлении теплообменников.

– *С. Кайтел, Я. Нойберт* «Лазерная сварка – новая область применения при сварке трубопроводов и железнодорожных транспортных средств». В докладе приведен обзор последних результатов исследований, направляемых на изучение особенностей применения процессов лазерной сварки труб при выполнении продольных и кольцевых швов трубопроводов и сварки железнодорожных транспортных средств. Представлены примеры применения ла-



зерной сварки трубопроводов для транспортировки нефти и газа, а также воды. Лазерная сварка железнодорожных транспортных средств применяется при сварке тележек и кузовов вагонов.

– *Я. Гурка, С. Стано* «Свойства и структура сварных соединений термомеханически обработанной стали S700MC, выполненных лазерной сваркой». В докладе приведены структура и свойства сварных соединений термомеханически обработанной стали S700MC с высоким пределом текучести, толщиной 10 мм, выполненных лазерной сваркой без присадочного материала. Процесс лазерной сварки без присадочного металла вызывает рост в шве содержания элементов ответственных за упрочнение ста-



ли (Ti, Nb), что способствует снижению ударной вязкости шва.

– Я. Адамиец, М. Виенцек «Технология лазерной сварки оребренных труб из сплава никеля Inconel 625». В докладе представлены технологии изготовления оребренных труб с применением инновационной технологии лазерной сварки, разработанной в АО «Энергоинсталь». Применение дисковых лазеров большой мощности позволяет производить сварку оребренных труб из сплава никеля, например Inconel 625.

– А. Иварсон «Соединение улучшенных высокопрочных сталей». Рассмотрены вопросы связанные со сваркой улучшенных высокопрочных сталей AHSS (Advanced High Strength Steel). Приведены принципы выбора присадочных сварочных материалов, величины погонной энергии и температура предварительного подогрева. Представлены технологические условия сварки сталей Weldox, Harbox и Domex.

– Л. Карлссон, А.-Е. Свенссон, К. Хуртиг «Влияние перемешивания на свойства шва в соединениях высокопрочных сталей». Химсостав высокопрочных сталей значительно отличается от химсостава присадочных материалов и их перемешивание может влиять на свойства шва. Последствия этого перемешивания исследованы при сварке сталей с пределом текучести 777 и 1193 МПа, выполненных несколькими способами дуговой сварки при использовании сварочных материалов с пределом прочности >800 МПа. Установлено, что при сварке высокопрочных сталей, необходимо принимать во внимание степень перемешивания и скорость охлаждения для оптимизации свойств выполняемых соединений.

– Б. Рутшигер «Влияние процесса наплавки на степень перемешивания валика, выполненного с помощью присадочного материала ERNiCrMo-3 (сплав типа 625) на подложке из нелегированной стали». В докладе описаны процессы наплавки способами: MIG/MG импульсной дугой, MIG/MAG Tandem, CMT, CMT Twin, TIG с подачей холодной и горячей проволоки, а также лазером. Во всех случаях был использован присадочный материал ERNiCrMo-3. Исследования полученных наплавов охватывали определение содержания в них железа и распределение этого элемента по высоте валика, а также оценку производительности наплавки, осуществленной всеми применяемыми процессами.

– П. Бернасowski «Примеры аварий магистральных газопроводов в Словакии». Представлен обзор аварий газопроводов высокого давления на территории Словакии. Все описанные случаи были вызваны сварочными дефектами, присутствием меди, неоднородностью микроструктуры и внешними факторами, такими как землетрясения, оползни.

– Я. Пилярчик, М.Ст. Венгловски «Использование электронного луча при сварке и родственных технологиях». Приведены примеры применения электронного луча в промышленности. Указаны области практического применения технологии, а также ее преимущества по сравнению с другими способами сварки.

– Б.Е. Патон, И.В. Кривцун, Г.С. Маринский и др. (доклад представлял А.Т. Зельниченко) «Высо-



кочастотная сварка и термическая обработка живых тканей». Представлены результаты исследований и разработок ИЭС им. Е. О. Патона в области высокочастотной сварки и родственных технологий при соединении, коагуляции, резке и термической обработке живых тканей, а также специализированного оборудования для реализации указанных процессов. Описан опыт применения разработанных технологий и оборудования в хирургической практике.



– Б.Е. Патон, Л.М. Лобанов, В.В. Лысак и др. «Бездеформационная сварка стрингерных панелей из титанового сплава BT-20». В докладе представлены результаты исследований, процесса сварки стрингерных панелей из титанового сплава с помощью проплавляющих швов. Тавровые образцы сваривались тремя способами: электроннолучевой сваркой, автоматической сваркой неплавящимся





электродом по слою флюса и погруженной дугой. С целью уменьшения сварочных напряжений и деформаций применялось предварительное упругое растяжение свариваемых элементов. На основании результатов испытаний образцов были подготовлены и сварены партии панелей типа стрингер длиной 1200 мм. Установлено, что выполнение проплавных швов аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом по слою активирующего флюса с использованием предварительного упругого деформирования и высокочастотной механической проковки швов обеспечивает более высокие показатели усталостной долговечности сварных стрингерных панелей из высокопрочного титанового сплава BT-20 по сравнению с электронно-лучевой сваркой и аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом погруженной дугой.

– В. Кузнецов, К. Шаповалов «Влияние наноксидов на структуру и свойства металла шва низколегированных сталей». Исследован эффект влияния нано оксидов на распределение неметаллических включений и структуру металла шва при сварке низколегированных сталей. Установлено, что при вводе в сварочную ванну 0,5 % нано оксидов алюминия и титана формируется структура игольчатого феррита с высокими показателями механических свойств.

– М. Белолев «Проектирование, изготовление и монтаж крупногабаритных элементов конструкций крыш резервуаров большого диаметра». Описан оригинальный способ изготовления крыш крупногабаритных резервуаров (диаметром 41 м) для хранения нефти. Габаритные размеры отдельных секций конструкции крыш типа зонтик были уменьшены путем деления их на две части, что увеличило объема работ, выполняемых в цеху и упростило доставку и монтаж и в итоге снизило затраты на изготовление. Приведены чертежи сварных соединений, вы-

полняемых покрытыми электродами и самозащитной порошковой проволокой.

– А. Пиетрас, А. Венгловска, Б. Рамс и др. «Сварка меди способом FSW». Целью работы была разработка технологии сварки FSW медных элементов толщиной свыше 15 мм, которая могла бы применяться при изготовлении токоподводов. Длина линии соединения элементов токоподводов составляет около 100 мм. Установлено, что соответствующим образом сформированные швы образуются при относительно низкой скорости вращения инструмента и хорошо охлаждаемом приспособлении для фиксации элементов.

– Д. Фыдрых, Г. Рогалски, Е. Лабановски «Вопросы подводной сварки высокопрочной стали». Представлены результаты исследований свариваемости высокопрочной стали в подводных условиях.

**Выставка ExpoWelding.** С 14 по 16 октября 2014 г. в Сосновице проведена очередная Международная сварочная выставка — ExpoWelding-2014, которая по праву является самым большим событием сварочной индустрии в Центральной и Восточной Европе. В работе выставки приняло участие более 170 компаний из Польши, Чехии, Финляндии, Нидерландов, Канады, Германии, Словакии, Швеции, Тайваня, Испании, Турции, Украины и Италии. Они представили более 250 известных брендов и 40 новинок, используемых в промышленности. Выставку посетило более 4700 специалистов сварщиков, руководителей фирм и компаний, представителей университетов и институтов из Польши, Германии, Словакии, Чехии, Украины и др. стран. Неотъемлемой частью ExpoWelding явилась ROBOTshow — ярмарка роботизации и автоматизации на которой в т.ч. была проведена презентация роботизации процессов сварки в промышленности с предложениями по приобретению технологий сварки для различных отраслей.

Во время работы выставки состоялся XVI Совет Международной Ассоциации «Сварка». В работе Совета приняли участие учредители МАС: ИЭС им. Е.О Патона, Польский институт сварки, «КЗУ груп инженеринг» (Болгария), Институт сварки «ЮГ» (Македония). Совет утвердил основные направления деятельности МАС и принял решение о проведении очередного XVII Совета Международной Ассоциации «Сварка» в Болгарии в октябре 2015 г. Во время проведения Совета МАС академику НАН Украины Л.М. Лобанову была вручена золотая медаль Польского технического общества за многолетний вклад в сотрудничество польских и украинских ученых-сварщиков.

А.Т. Зельниченко

## УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ ЗА 2014 г.

**ПЕРЕДОВИЦА**

Институту электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины — 80 № 9

Интервью с генеральным директором ОАО «Турбоатом» В. Г. Субботиным № 12

К 100-летию со дня рождения В. А. Сахарнова № 1

Опытный завод сварочного оборудования Института электросварки им. Е. О. Патона на современном этапе № 4

50 лет кафедре оборудования и технологии сварочного производства Запорожского национального технического университета № 4

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

АНОШИН В. А., ИЛЮШЕНКО В. М., БОНДАРЕНКО А. Н., ЛУКЪЯНЧЕНКО Е. П., НИКОЛАЕВ А. К. Комплексная оценка влияния основных примесей на свариваемость меди № 11

БАБИНЕЦ А. А., РЯБЦЕВ И. А., КОНДРАТЬЕВ И. А., РЯБЦЕВ И. И., ГОРДАНЬ Г. Н. Исследование термической стойкости наплавленного металла, предназначенного для восстановления прокатных валков № 5

БАХМАНН М., АВИЛОВ В., ГУМЕНЮК А., РЕТМАЙЕР М. Сварка аустенитной нержавеющей стали с использованием лазерного луча высокой мощности и электромагнитного управления сварочной ванной № 3

БЕЛЯВИН А. Ф., КУРЕНКОВА В. В., ФЕДОТОВ Д. А. Долговечность наплавленных ремонтных швов на монокристалльном жаропрочном никелевом сплаве в условиях циклического окисления № 2

БОНДАРЕВ А. А., НЕСТЕРЕНКОВ В. М. Технологические особенности сварки деформируемых магниевых сплавов электронным лучом в вакууме № 3

БОРИСОВ Ю. С., БОРИСОВА А. Л., АСТАХОВ Е. А., БУРЛАЧЕНКО А. Н., ИПАТОВА З. Г., ГОРБАНЬ В. Ф. Детонационные покрытия из композиционного порошка ферромолибден-карбид кремния, полученного методом механохимического синтеза № 3

БОРИСОВ Ю. С., ВОЙНАРОВИЧ С. Г., КИСЛИЦА А. Н., КАЛЮЖНЫЙ С. Н. Исследование пятна напыления и фигуры металлизации в условиях микроплазменного нанесения покрытия из диоксида титана № 12

БУЗОРИНА Д. С., ШОЛОХОВ М. А., ШАЛИМОВ М. П. Совершенствование методики расчета пара-

метров режима многопроходной сварки в защитных газах № 10

БУТ В. С., МАКСИМОВ С. Ю., ОЛЕЙНИК О. И. Склонность к трещинообразованию сварных соединений ремонтных конструкций на магистральных газопроводах № 11

ВЕРЕЩАГО Е. Н., КОСТЮЧЕНКО В. И. Неустойчивость режима в цепи с емкостью и электрической дугой, питаемой от источника постоянного тока № 8

ВЛАСОВ А. Ф., МАКАРЕНКО Н. А., КУЩИЙ А. М. Нагрев и плавление электродов с экзотермической смесью в покрытии № 6–7

ГАЙВОРОНСКИЙ А. А. Сопrotивляемость образованию холодных трещин металла ЗТВ сварного соединения высокопрочных углеродистых сталей № 2

ГАЙВОРОНСКИЙ А. А., ЖУКОВ В. В., ВАСИЛЬЕВ В. Г., ЗУБЕР Т. А., ШИШКЕВИЧ А. С. Структурные изменения в участке перегрева металла ЗТВ железнодорожных колес при дуговой наплавке № 1

ГОЛОВКО В. В., СТЕПАНЮК С. Н., ЕРМОЛЕНКО Д. Ю. Роль сварочного флюса в формировании металла шва при дуговой сварке низколегированных и высокопрочных сталей № 6–7

ГОНЧАРОВ И. А., ГАЛИНИЧ В. И., МИЩЕНКО Д. Д., СУДАВЦОВА В. С. Прогнозирование термодинамических свойств расплавов системы  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$  № 4

ГРИГОРЕНКО Г. М., АДЕЕВА Л. И., ТУНИК А. Ю., СТЕПАНЮК С. Н., ПОЛЕЩУК М. А., ЗЕЛЕНИН Е. В. Особенности структуры сварных соединений металлов с различной растворимостью элементов в твердой фазе, полученных сваркой трением с перемешиванием № 4

ГУБЕНЯ И. П., ЯВДОЩИН И. Р., СТЕПАНЮК С. Н., ДЕМЕЦКАЯ А. В. К вопросу дисперсности и морфологии частиц в сварочных аэрозолях № 6–7

ДЕМИДЕНКО Л. Ю., ОНАЦКАЯ Н. А., ПОЛОВИНКА В. Д. Влияние температуры термомеханической обработки на качество соединений разнородных металлов № 12

ДМИТРИК В. В., БАРТАШ С. Н. Особенности деградации металла сварных соединений паропроводов ТЭС № 6–7

ДУБОВОЙ А. Н., КАРПЕНЧЕНКО А. А., БОБРОВ М. Н. Повышение эксплуатационных свойств электродуговых и плазменных покрытий электроимпульсным воздействием на двухфазный высокотемпературный поток № 8

**ЖУДРА А. П.** Исследование износостойкости композиционных сплавов в условиях газообразного износа при повышенных температурах № 11

**ЗАХАРОВ Л. С., ГАВРИК А. Р., ЛИПОДАЕВ В. Н.** Электроды для сварки разнородных мартенситных хромистых и аустенитных хромоникелевых сталей № 6–7

**ЕЛАГИН В. П.** Выбор защитного газа для механизированной дуговой сварки разнородных сталей № 6–7

**ЕРМОЛАЕВ Г. В., МАРТЫНЕНКО В. А., МАРУНИЧ И. В.** Влияние размеров выпуклости шва на напряженное состояние стыкового соединения при растяжении № 8

**ЕРМОЛЕНКО Д. Ю., ГОЛОВКО В. В.** Численное моделирование и прогнозирование микроструктуры металла сварных швов при сварке высокопрочных сталей (Обзор) № 3

**Кафедра сварочного производства Национального университета кораблестроения им. Адмирала Макарова 55 лет** № 8

**КВАСНИЦКИЙ В. В., КВАСНИЦКИЙ В. Ф., МАРКАШОВА Л. И., МАТВИЕНКО М. В.** Влияние напряженно-деформированного состояния на структуру и свойства соединений при диффузионной сварке разнородных металлов № 8

**КВАСНИЦКИЙ В. Ф., КВАСНИЦКИЙ В. В., ЧЕРЕНДА Н. Н., КОВАЛЬ Н. Н., ЛЕВЧЕНКО И. Л.** Закономерности создания модифицированных прослоек при использовании высококонцентрированных потоков энергии № 8

**КНЫШ В. В., КЛОЧКОВ И. Н., ПАШУЛЯ М. П., МОТРУНИЧ С. И.** Повышение сопротивления усталости тонколистовых сварных соединений алюминиевых сплавов высокочастотной проковкой № 5

**КОЛЕСАР И. А., ЕРМОЛАЕВ Г. В.** Напряженно-деформированное состояние при силовом и температурном нагружении узлов из разнородных сталей с мягкой прослойкой № 8

**КОРЖИК В. Н., БОРИСОВА А. Л., ГОРДАНЬ Г. Н., ЛЮТИК Н. П., ЧАЙКА А. А., КАЙДА Т. В.** Особенности структуры покрытий из порошковой проволоки системы Fe–Cr–Al, полученных в условиях сверхзвуковой электродуговой металлизации № 2

**КОРЖИК В. Н., БОРИСОВА А. Л., ПОПОВ В. В., КОЛОМЫЦЕВ М. В., ЧАЙКА А. А., ТКАЧУК В. И., ВИГИЛЯНСКАЯ Н. В.** Керметные покрытия системы «карбид хрома–нихром», полученные методом сверхзвукового воздушно-газового плазменного напыления № 12

**КРИКЕНТ И. В., КРИВЦУН И. В., ДЕМЧЕНКО В. Ф.** Моделирование электрической дуги с тугоплавким катодом и испаряющимся анодом № 9

**КУЗЬМЕНКО Д. Н., УСТИНОВ А. И., КОСИНЦЕВ С. Г., ПЕТРУШИНЕЦ Л. В.** Влияние скорости нагрева на температуру воспламенения многослойной фольги Ti/Al № 10

**КУЧУК-ЯЦЕНКО С. И., ШВЕЦ Ю. В., ШВЕЦ В. И.** Влияние неметаллических включений в трубных сталях класса прочности X65–X80 на показатели ударной вязкости сварных соединений, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением № 12

**ЛАНКИН Ю. Н., РЯБЦЕВ И. А., СОЛОВЬЕВ В. Г., ЧЕРНЯК Я. П., ЖДАНОВ В. А.** Влияние электрических параметров дуговой наплавки порошковой проволокой на стабильность процесса и проплавление основного металла № 9

**ЛАНКИН Ю. Н., СУШИЙ Л. Ф., БАЙШТРУК Е. Н.** Система измерения температуры биологических тканей при биполярной высокочастотной сварке № 11

**ЛЕБЕДЕВ В. А., ДРАГАН С. В., ГОЛОБОРОДЬКО Ж. Г., СИМУТЕНКОВ И. В., ЯРОС Ю. А.** Технологические характеристики автоматической наплавки под флюсом с высокочастотными колебаниями торца электрода № 8

**ЛЕВЧЕНКО О. Г., МАЛАХОВ А. Т., АРЛАМОВ А. Ю.** Ультрафиолетовое излучение при ручной дуговой сварке покрытыми электродами № 6–7

**ЛОБАНОВ Л. М., ПАЩИН Н. А., МИХОДУЙ О. Л., СОЛОМИЙЧУК Т. Г.** Устранение местных деформаций типа «бухтина» путем электродинамической обработки № 11

**МАЙДАНЧУК Т. Б., СКОРИНА Н. В.** Улучшение технологичности изготовления и сварочных свойств электродов для сварки и наплавки оловянных бронз № 6–7

**МАКСИМОВ С. Ю., МАЧУЛЯК В. В., ШЕРЕМЕТА А. В., ГОНЧАРЕНКО Е. И.** Исследование влияния микролегирования титаном и бором металла шва на его механические свойства при сварке под водой № 6–7

**МАКСИМОВА С. В., ХОРУНОВ В. Ф., МЯСОЕД В. В., ВОРОНОВ В. В., КОВАЛЬЧУК П. В.** Микроструктура паяных соединений алюминидов никеля № 10

**МАРКАШОВА Л. И., КУШНАРЕВА О. С., АЛЕКСЕЕНКО И. И.** Влияние скандийсодержащей проволоки на структуру и свойства соединений алюминий-литиевых сплавов, выполненных аргонодуговой сваркой № 6–7

**МАРКАШОВА Л. И., ПОЗНЯКОВ В. Д., БЕРДНИКОВА Е. Н., ГАЙВОРОНСКИЙ А. А., АЛЕКСЕЕНКО Т. А.** Влияние структурных факторов на механические свойства и трещиностойкость сварных соединений металлов, сплавов, композиционных материалов № 6–7

**МАРЧЕНКО А. Е.** Влияние зернового состава шихты на реологические характеристики и струк-

туру напорного потока обмазочных масс для низковольтных электродов № 6–7

МАРЧЕНКО А. Е. Разнотолщинность электродных покрытий как следствие эластической турбулентности обмазочных масс в состоянии неизотермического напорного потока № 6–7

МАХЛИН Н. М., КОРОТЫНСКИЙ А. Е. Анализ и методика расчета электронных устройств последовательного включения для бесконтактного возбуждения дуги № 1

МАХНЕНКО О. В., ВЕЛИКОИВАНЕНКО Е. А., МИРЗОВ И. В. Перераспределение остаточных сварочных напряжений во внутрикорпусной шахте реактора ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации № 11

МОЛТАСОВ А. В., САМОТРСОВ С. М., КНЫШ В. В., ЧВЕРТКО П. Н., ГУЩИН К. В. Влияние неравномерности нагрева на величину усилия осадки и время проковки при контактной стыковой сварке плоского кольца № 10

ОСИН В. В. Триботехнические свойства наплавленного металла типа 50Х9С3Г с повышенным содержанием серы № 12

ПАЛЬЦЕВИЧ А. П., СИНЮК В. С., ИГНАТЕНКО А. В. Взаимодействие водорода с деформируемым металлом № 6–7

ПАТОН Б. Е., ЛОБАНОВ Л. М., ЛЫСАК В. В., КНЫШ В. В., ПАВЛОВСКИЙ В. И., ПРИЛУЦКИЙ В. П., ТИМОШЕНКО А. Н., ГОНЧАРОВ П. В., ГУАНЬ ЦЯО. Бездеформационная сварка стрингерных панелей из титанового сплава BT20 № 9

ПАТОН Б. Е., САВИЦКИЙ М. М., САВИЦКИЙ А. М., МАЗУР А. А. Эффективность морской транспортировки природного газа при использовании сварных баллонов высокого давления № 8

ПЕРЕМИТЬКО В. В. Износостойкая дуговая наплавка по слою легирующей шихты № 8

ПИСЬМЕННЫЙ А. А. Повышение энергоэффективности машин для контактной точечной сварки за счет продольной компенсации реактивной мощности № 1

ПОЗНЯКОВ В. Д., МАРКАШОВА Л. И., МАКСИМЕНКО А. А., БЕРДНИКОВА Е. Н., АЛЕКСЕЕНКО Т. А., КАСАТКИН С. Б. Влияние циклического нагружения на микроструктуру и хладостойкость металла ЗТВ стали 10Г2ФБ № 5

ПОЛИШКО А. А., САЕНКО В. Я., ТУНИК А. Ю., СТЕПАНЮК С. Н. Структура зоны оплавления литого высоконикелевого сплава ХН56МБЮДШ после лазерной поверхностной обработки № 3

СЕМЕНОВ А. П. Методы математического моделирования процессов формирования и переноса капель электродного металла при сварке плавящимся электродом (Обзор) № 10

СЕМЕНОВ А. П., ШУБА И. В., КРИВЦУН И. В., ДЕМЧЕНКО В. Ф. Моделирование поведения сварочной ванны при точечной сварке импульсным лазерным излучением № 4

СТРЕЛЕНКО Н. М., ЖДАНОВ Л. А., ГОНЧАРОВ И. А. Флюс для электродуговой наплавки, обеспечивающий высокотемпературную отделимость шлакового покрытия № 6–7

СУХОВАЯ Е. В. Квазикристаллические сплавы-наполнители для композиционных слоев, полученных методом печной наплавки № 1

ТОРОП В. М., ГАРФ Э. Ф., ЯКИМКИН А. В., ГОПКАЛО Е. Е. Определение причин возникновения трещин в конструктивных элементах башни новой вентиляционной трубы на Чернобыльской АЭС № 1

ФЕДОРЧУК В. Е., КУШНАРЕВА О. С., АЛЕКСЕЕНКО Т. А., ФАЛЬЧЕНКО Ю. В. Особенности легирования скандием металла швов сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов № 5

ХОРУНОВ В. Ф., ЛОТОЦКИЙ П. Н. Особенности выплавки, структура и свойства никелевых сплавов системы Ni–Mn–Cu № 5

ХОРУНОВ В. Ф., СТЕФАНОВ Б. В., МАКСИМОВА С. В. Влияние никеля и марганца на структуру сплавов системы Ag–Cu–Zn–Sn и прочность паяных соединений № 4

ШЕЛЯГИН В. Д., МАРКАШОВА Л. И., ХАСКИН В. Ю., БЕРНАЦКИЙ А. В., КУШНАРЕВА О. С. Лазерное и лазерно-микроплазменное легирование поверхности образцов из стали 38ХНЗМ-ФА № 2

ШЛЕПАКОВ В. Н. Физико-металлургические и сварочно-технологические свойства газозащитных порошковых проволок для сварки конструкционных сталей № 6–7

ЮЩЕНКО К. А., БУЛАТ А. В., КАХОВСКИЙ Н. Ю., САМОЙЛЕНКО В. И., МАКСИМОВ С. Ю., ГРИГОРЕНКО С. Г. Исследование химического состава и структуры металла швов типа Х20Н9Г2Б, полученных при мокрой подводной сварке № 6–7

ЮЩЕНКО К. А., КАХОВСКИЙ Ю. Н., БУЛАТ А. В., МОРОЗОВА Р. И., ЗВЯГИНЦЕВА А. В., САМОЙЛЕНКО В. И., ОЛЕЙНИК Ю. В. Исследование переходной зоны соединения низкоуглеродистой стали с высоколегированным Cr–Ni наплавленным металлом № 6–7

ЮЩЕНКО К. А., САВЧЕНКО В. С., ЧЕРВЯКОВ Н. О., ЗВЯГИНЦЕВА А. В., МОНЬКО Г. Г., ПЕСТОВ В. А. Исследование склонности к образованию трещин аустенитного материала с использованием методики PVR-test № 6–7

ЮЩЕНКО К. А., ЯРОВИЦЫН А. В. Влияние содержания активных газов и сплошности дисперсной присадки на процесс формирования валика при микроплазменной порошковой наплавке никелевых жаропрочных сплавов № 6–7

### ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

АНТИПОВ Ю. Н., ДМИТРЕНКО Е. В., КОВАЛЕНКО А. В., ГОРЯНОЙ С. А., РЫБАКОВ А. А., СЕМЕНОВ С. Е., ФИЛИПЧУК Т. Н. Технология производства газонефтепроводных труб способом высокочастотной сварки на ПАО «Интерпайп НМТЗ» № 3

АХОНИН С. В., БЕЛОУС В. Ю., АНТОНЮК С. Л., ПЕТРИЧЕНКО И. К., СЕЛИН Р. В. Свойства соединений высокопрочного титанового сплава Т110, выполненных сваркой плавлением № 1

БРЫЗГАЛИН А. Г. Оценка эффективности снижения остаточных напряжений в кольцевых соединениях труб послесварочной обработкой взрывом № 5

БУТ В. С., ОЛЕЙНИК О. И. Развитие в Украине технологий ремонта дуговой сваркой магистральных трубопроводов в условиях эксплуатации № 5

ВОРОНЧУК А. П. Порошковые ленты для износостойкой наплавки № 6–7

ГНАТЕНКО М. Ф., ВОРОШИЛО В. С., СУЧОК А. Д. Направления совершенствования оборудования и технологии производства электродов № 6–7

ГРЕЧАНЮК Н. И., КУЧЕРЕНКО П. П., МЕЛЬНИК А. Г., КОВАЛЬЧУК Д. В., ГРЕЧАНЮК И. Н. Промышленная электронно-лучевая установка L-8 для осаждения теплозащитных покрытий на лопатки турбин № 10

ЕФИМЕНКО Н. Г., АТОЖЕНКО О. Ю., ВАВИЛОВ А. В., КАНТОР А. Г., УДАЛОВА Е. И. Структура и свойства сварных соединений стали 15X1M1ФЛ при исправлении дефектов литья способом поперечной горки № 2

ЖИЗНЯКОВ С. Н. Сухой лед – полезный материал при выполнении сварки № 4

ЖУДРА А. П. Наплавочные материалы на основе карбидов вольфрама № 6–7

ЖУДРА А. П., КРИВЧИКОВ С. Ю., ДЗЫКОВИЧ В. И. Использование комплексно-легированных порошков, полученных методом термоцентрибежного распыления, в порошковых проволоках № 12

ЗАЛЕВСКИЙ А. В., ГАЛИНИЧ В. И., ГОНЧАРОВ И. А., ОСИПОВ Н. Я., НЕТЯГА В. И., КИРИЧЕНКО О. П. Новые возможности старейшего предприятия по производству сварочных флюсов № 6–7

ЗЯХОР И. В., ЗАВЕРТАННЫЙ М. С., ЧЕРНОБАЙ С. В. Линейная сварка трением металлических материалов (Обзор) № 12

ИЛЮШЕНКО В. М., АНОШИН В. А., МАЙДАНЧУК Т. Б., ЛУКЬЯНЧЕНКО Е. П. Эффективность применения новых сварочных материалов при сварке и наплавке меди и ее сплавов (Обзор) № 6–7

КАЙТЕЛЬ С., АХРЕНС С., МОЛЛ Х. Использование компьютерных технологий в обучении сварщиков № 10

КАЙТЕЛЬ С., НОЙБЕРТ Я. Технологии гибридной лазерно-дуговой сварки кольцевых швов на магистральных трубопроводах № 4

КАЛЕКО Д. М. Ударная конденсаторная сварка проволоки из композитного сверхпроводящего сплава № 4

КНЫШ В. В., СОЛОВЕЙ С. А., КУЗЬМЕНКО А. З. Эффективность упрочнения высокочастотной механической проковкой стыковых сварных соединений с длительной наработкой № 11

КОНДРАТЬЕВ И. А., РЯБЦЕВ И. А. Порошковые проволоки для наплавки стальных валков горячей прокатки № 6–7

КОНОНЕНКО В. Я. Подводная сварка и резка в странах СНГ № 6–7

КОРОТЫНСКИЙ А. Е., ДРАЧЕНКО Н. П., ШАПКА В. А. Особенности применения суперконденсаторов в устройствах для импульсных технологий сварки № 9

КОРСУНОВ К. А., АШИХМИНА Е. А. Анализ некоторых физико-технических характеристик ионно-плазменного покрытия (TiZr)N на лопатках ротора компрессора газотурбинного вертолетного двигателя ТВ3-117 № 2

КОСТИН А. М., БУТЕНКО А. Ю., КВАСНИЦКИЙ В. В. Материалы для упрочнения лопаток газовых турбин № 6–7

КУСКОВ Ю. М. Дискретные присадочные материалы для наплавки в токоподводящем кристаллизаторе № 6–7

ЛЕБЕДЕВ В. А., МАКСИМОВ С. Ю., ПИЧАК В. Г., ЗАЙНУЛИН Д. И. Автомат для дуговой подводной сварки мокрым способом в стесненных условиях № 9

ЛЕВЧЕНКО О. Г., КУЛЕШОВ В. А., АРЛАМОВ А. Ю. Санитарно-гигиеническая оценка шума при ручной дуговой сварке покрытыми электродами № 9

ЛИВШИЦ И. М. Оценка пригодности сварочной проволоки типа Св-10ГН1МА производства фирмы ЭСАБ для изготовления оборудования АЭС № 6–7

ЛОБАНОВ Л. М., ГАРФ Э. Л., КОПЫЛОВ Л. Н., СИНЕОК А. Г. 40 лет сварной конструкции башни Киевского телецентра № 1

ЛОБАНОВ Л. М., МАХНЕНКО О. В., САПРЫКИНА Г. Ю., ПУСТОВОЙ А. Д. Расчет на усталость сварных соединений несущих элементов тележки грузового вагона № 10

МАЗУР А. А., ПУСТОВОЙ С. В., ПЕТРУК В. С., БРОВЧЕНКО Н. С. Рынок сварочных материалов Украины № 6–7

МАЗУР А. А., ПУСТОВОЙ С. В., МАКОВЕЦКАЯ О. К., БРОВЧЕНКО Н. С., ПЕТРУК В. С. Состояние и перспективы мирового и региональных рынков сварочных материалов (Обзор) № 11

МАЙДАНЧУК Т. Б. Электродные и присадочные материалы для наплавки и сварки литейных оловянных бронз (Обзор) № 1

МАХНЕНКО О. В., САПРЫКИНА Г. Ю., МИРЗОВ И. В., ПУСТОВОЙ А. Д. Перспективы создания сварных конструкций несущих элементов тележки грузового вагона № 3

НЕСТЕРЕНКОВ В. М., БОНДАРЕВ А. А. Электронно-лучевая сварка крупногабаритных толстолистовых конструкций из сплавов магния № 2

ПАЛИЕВСКАЯ Е. А., СИДЛИН З. А. Состояние сырьевой базы электродного производства № 6–7

ПАТОН Б. Е., РИМСКИЙ С. Т., ГАЛИНИЧ В. И. Применение защитных газов в сварочном производстве (Обзор) № 6–7

ПАТОН Б. Е., САВИЦКИЙ М. М., САВИЦКИЙ А. М., МАЗУР А. А. Эффективность морской транспортировки природного газа при использовании сварных баллонов высокого давления № 8

ПЕРЕМИТЬКО В. В. Износостойкая дуговая наплавка по слою легирующей шихты № 8

ПЕРЕПЛЕТЧИКОВ Е. Ф. Разработка высокованадиевого сплава для плазменно-порошковой наплавки ножей для резки неметаллических материалов № 6–7

ПЕРЕПЛЕТЧИКОВ Е. Ф., РЯБЦЕВ И. А., ЛАНКИН Ю. Н., СЕМИКИН В. Ф., ОСЕЧКОВ П. П. Модернизация системы управления процессом плазменно-порошковой наплавки установки А1756 № 12

ПИСЬМЕННЫЙ А. А., ГУБАТЮК Р. С., ПРОКОФЬЕВ А. С., МУЖИЧЕНКО А. Ф., ШИНКАРЕНКО А. С. Сварнопаяные трубные заготовки для трубопроводов и сосудов высокого давления № 10

ПОЛЕЩУК М. А., АТРОШЕНКО М. Г., ПУЗРИН А. Л., ШЕВЦОВ В. Л. Оценка возможности получения равнопрочного соединения крупных стальных деталей методом автовакуумной пайки резбового профиля № 10

Присадочные прутки «Cobelco Welding» для выполнения корневых проходов в соединениях нержавеющей сталей без защиты обратной стороны шва № 1

ПРОЦЕНКО Н. А. Состояние нормативной базы, сертификации и аттестации сварочных материалов в Украине № 6–7

РОЗЕРТ Р. Применение порошковых проволок для сварки в промышленных условиях № 6–7

РОЯНОВ В. А., БОБИКОВ В. И. Применение пульсирующей расплывающей струи при электродуговой металлизации № 6–7

РЫБАКОВ А. А., ГОНЧАРЕНКО Л. В., ФИЛИПЧУК Т. Н., ЛОХМАН И. В., БУРАК И. З. Причины стресс-коррозионного разрушения монтажного кольцевого соединения магистрального газопровода № 3

САЕНКО В. Я., ПОЛИШКО А. А., РЯБЕНИН В. А., СТЕПАНЮК С. Н. Электронно-лучевая сварка листового технического титана ВТ1-0, упрочненного азотом в процессе дугошлакового переплава № 11

СОЛОМКА Е. А., ЛОБАНОВ А. И., ОРЛОВ Л. Н., ГОЛЯКЕВИЧ А. А., ХИЛЬКО А. В. Восстановительная и упрочняющая наплавка деталей штампового оборудования № 6–7

СТЕКЛОВ О. И., АНТОНОВ А. А., СЕВОСТЬЯНОВ С. П. Обеспечение целостности сварных конструкций и сооружений при их длительной эксплуатации с применением реновационных технологий № 6–7

СТЕФАНИВ Б. В., ХОРУНОВ В. Ф., САБАДАШ О. М., МАКСИМОВА С. В., ВОРОНОВ В. В. Особенности восстановления промышленного канала стального бурового долота № 11

ТУРЫК Э. В. Дефекты изготовления сварочных материалов, влияющие на качество сварных соединений № 6–7

ЧВЕРТКО П. Н., ГОРОНКОВ Н. Д., ВИНОГРАДОВ Н. А., САМОТРСОВ С. М., СЫСОЕВ В. Ю. Контактная стыковая сварка арматуры железобетона в условиях стройплощадки № 3

ЧВЕРТКО П. Н., МОЛТАСОВ А. В., САМОТРСОВ С. М. Расчет усилия осадки при контактной стыковой сварке изделий замкнутой формы № 1

ЧВЕРТКО П. Н., СЕМЕНОВ Л. А., ГУЩИН К. В. Контактная стыковая сварка оплавлением тонкостенных профилей из термически упрочняемых алюминиевых сплавов № 12

ШЕЛЯГИН В. Д., ОРИШИЧ А. М., ХАСКИН В. Ю., МАЛИКОВ А. Г., ЧАЙКА А. А. Технологические особенности лазерной, микроплазменной и гибридной лазерно-микроплазменной сварки алюминиевых сплавов № 5

ШМИДТ М., КУРЫНЦЕВ С. В. Получение биметаллических заготовок с помощью лазерной сварки проплавным швом № 4

ЮЩЕНКО К. А., КОЗУЛИН С. М., ЛЫЧКО И. И., КОЗУЛИН М. Г. Соединение металла большой толщины многопроходной электрошлаковой сваркой № 9

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Диссертация на соискание ученой степени № 4, 8, 10, 12

Сотрудничество ученых и производителей № 4

Фильтровентиляционное оборудование из Германии № 4

### ХРОНИКА

Васильеву Ю. С. — 70 № 4

Григоренко Г. М. — 75 № 9

Данильченко Б. В. — 75 № 4

19-я сессия Научного совета по новым материалам при Комитете по естественным наукам Международной ассоциации академий наук № 8

Демченко В. Ф. — 75 № 9

Кривцуну И. В. — 60 № 10

К 100-летию со дня рождения В. В. Подгаецкого № 2

К 100-летию со дня рождения А. И. Четвертко № 3

Куцаку В. С. — 70 № 2

Лауреаты Премии им. Е. О. Патона № 5

Международная выставка «Сварка 2014» № 8

Международная конференция «Сварка и родственные технологии — настоящее и будущее» № 1

Международная конференция «Сварочные материалы» № 8

Международная конференция «Титан-2014 в СНГ» № 8

Открытие мемориальной доски № 2

Памяти В. А. Богдановского № 4

Памяти П. В. Гладкого № 2

Памяти А. А. Кайдалова № 4

Памяти Л. С. Киреева № 4

Памяти В. И. Лакомского № 2

Памяти О. К. Назаренко № 10

Памяти В. С. Романюка № 5

56-я Международная конференция «Сварка — всегда может больше» № 12

Седьмая международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» № 10

Семинар «Автоматизация сварочных процессов» № 8

Семинар «Проблемы организации сварочных работ в Украине. Новые технологии и оборудование для высококачественной сварки» № 1

Харченко Г. К. — 80 № 8

Чепурному А. Д. — 70 № 3

### ИНФОРМАЦИЯ

Внедрение роботизированных комплексов в сварочном производстве № 5

Внешнеторговая «Фирма «ИНПАТ» ИЭС им. Е. О. Патона» сегодня № 2

Высокотехнологичное оборудование для процессов изготовления и ремонта теплообменного оборудования от компании «ДельтаСвар» № 9

Высокотехнологичное сварочное оборудование для роботизированных комплексов № 9

20 лет в мире порошковых проволок № 1

Календарь выставок и конференций в 2014 г. (сварка и родственные технологии) № 1

Комплект импульсно-дуговой сварки для сварочной системы MIG/MAG TPS/i № 11

Комплексные решения по очистке воздуха производственных помещений № 11

Мобильная сварка от аккумулятора № 2

Новые возможности дуговой сварки с процессом LSC № 9

Новый стандарт EN 1090 — новые пакеты технологических инструкций WPS от «FRONIUS» № 5

ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ — 55 № 9

Опытный завод сварочных материалов Института электросварки им. Е. О. Патона № 9

Опытному заводу сварочного оборудования Института электросварки им. Е. О. Патона — 55 № 9

ПАО «Коростенский завод химического машиностроения» — на пути реконструкции и перевооружения № 5

«Патон Турбайн Текнолоджиз» — новое название известной компании № 9

Программа профессиональной подготовки на 2015 г. № 12

Присадочные прутки «Kobelco Welding» для выполнения корневых проходов в соединениях нержавеющей сталей без защиты обратной стороны шва № 3

Промышленный аутсорсинг № 9

Сокращение рисков при сварке под слоем флюса офшорных сооружений № 9

TPS/i: новое поколение интеллектуальных сварочных систем № 2

Универсальные сварочные горелки от компании «ШТОРМ» № 11

Установки для автоматической сварки продольных швов обечаек — высокая надежность и простота в эксплуатации № 5

Указатель авторов № 12

Указатель статей за 2014 г. № 12

Эргономичные и доступные инверторные аппараты MicorMIG для сварки в защитных газах № 3

## УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

- А**виллов В. № 3  
 Адеева Л. И. № 4  
 Алексеенко И. И. № 6–7  
 Алексеенко Т. А. № 5, 6–7  
 Аношин В. А. № 6–7, 11  
 Антипов Ю. Н. № 3  
 Антонов А. А. № 6–7  
 Антонюк С. Л. № 1  
 Арламов А. Ю. № 6–7, 9  
 Астахов Е. А. № 3  
 Атоженко О. Ю. № 2  
 Атрошенко М. Г. № 10  
 Ахонин С. В. № 1  
 Ахренс С., № 10  
 Ашихмина Е. А. № 2  
**Б**абинец А. А. № 5  
 Байштрук Е. Н. № 11  
 Баргаш С. Н. № 6–7  
 Бахманн М. № 3  
 Белоус В. Ю. № 1  
 Белявин А. Ф. № 2  
 Бердникова Е. Н. № 5, 6–7  
 Бернацкий А. В. № 2  
 Бобиков В. И. № 6–7  
 Бобров М. Н. № 8  
 Бондарев А. А. № 2, 3  
 Бондаренко А. Н. № 11  
 Борисов Ю. С. № 3  
 Борисова А. Л. № 2, 3, 12  
 Бровченко Н. С. № 6–7, 11  
 Брызгалин А. Г. № 5  
 Бузорина Д. С. № 10  
 Булат А. В. № 6–7 (2)  
 Бурак И. З. № 3  
 Бурлаченко А. Н. № 3  
 Бут В. С. № 5, 11  
 Бутенко А. Ю. № 6–7  
**В**авилов А. В. № 2  
 Васильев В. Г. № 1  
 Великоиваненко Е. А. № 11  
 Верещаго Е. Н. № 8  
 Вигилянская Н. В. № 12  
 Виноградов Н. А. № 3  
 Власов А. Ф. № 6–7  
 Воронов В. В. № 10, 11  
 Ворончук А. П. № 6–7  
 Ворошило В. С. № 6–7  
**Г**аврик А. Р. № 6–7  
 Гайворонский А. А. № 1, 2, 6–7  
 Галинич В. И. № 4, 6–7 (2)  
 Гарф Э. Ф. № 1 (2)  
 Гнатенко М. Ф. № 6–7  
 Голобородько Ж. Г. № 8  
 Головки В. В. № 3, 6–7  
 Голякевич А. А. № 6–7  
 Гончаренко Е. И. № 6–7  
 Гончаренко Л. В. № 3  
 Гончаров И. А. № 4, 6–7 (2)  
 Гончаров П. В. № 9  
 Гопкало Е. Е. № 1  
 Горбань В. Ф. № 3  
 Гордань Г. Н. № 2, 5  
 Горонков Н. Д. № 3  
 Горяной С. А. № 3  
 Гречанюк И. Н. № 10  
 Гречанюк Н. И. № 10  
 Григоренко Г. М. № 4  
 Григоренко С. Г. № 6–7  
 Гуань Цяо № 9  
 Губатюк Р. С. № 10  
 Губеня И. П. № 6–7  
 Гуменюк А. № 3  
 Гушин К. В. № 10, 12  
**Д**емецкая А. В. № 6–7  
 Демиденко Л. Ю. № 12  
 Демченко В. Ф. № 4, 9  
 Дзыкович В. И. № 12  
 Дмитренко Е. В. № 3  
 Дмитрик В. В. № 6–7  
 Драган С. В. № 8  
 Драченко Н. П. № 9  
 Дубовой А. Н. № 8  
**Е**лагин В. П. № 6–7  
 Ермолаев Г. В. № 8 (2)  
 Ермоленко Д. Ю. № 3, 6–7  
 Ефименко Н. Г. № 2  
**Ж**данов В. А. № 9  
 Жданов Л. А. № 6–7  
 Жизняков С. Н. № 4  
 Жудра А. П. № 6–7, 11, 12  
 Жуков В. В. № 1  
**З**айнулин Д. И. № 9  
 Залевский А. В. № 6–7  
 Завертаный М. С. № 12  
 Звягинцева А. В. № 6–7 (2)  
 Захаров Л. С. № 6–7  
 Зеленин Е. В. № 4  
 Зубер Т. А. № 1  
 Зяхор И. В. № 12  
**И**гнатенко А. В. № 6–7  
 Илюшенко В. М. № 6–7, 11  
 Ипатова З. Г. № 3  
**К**айда Т. В. № 2  
 Кайтел С. № 4, 10  
 Калеко Д. М. № 4  
 Кантор А. Г. № 2  
 Карпенченко А. А. № 8  
 Касаткин С. Б. № 5  
 Каховский Н. Ю. № 6–7  
 Каховский Ю. Н. № 6–7  
 Квасницкий В. В. № 6–7, 8 (2)  
 Квасницкий В. Ф. № 8 (2)  
 Кириченко О. П. № 6–7  
 Клочков И. Н. № 5  
 Кныш В. В. № 5, 9–11  
 Коваленко А. В. № 3  
 Коваль Н. Н. № 8  
 Ковальчук Д. В. № 10  
 Ковальчук П. В. № 10  
 Козулин М. Г. № 9  
 Козулин С. М. № 9  
 Колесар И. А. № 8  
 Коломыцев М. В. № 12  
 Кондратьев И. А. № 5, 6–7  
 Кононенко В. Я. № 6–7  
 Копылов Л. Н. № 1  
 Коржик В. Н. № 2, 12  
 Коротынский А. Е. № 1, 9  
 Корсунов К. А. № 2  
 Косинцев С. Г. № 10  
 Костин А. М. № 6–7  
 Костюченко В. И. № 8  
 Кривцун И. В. № 4, 9  
 Кривчиков С. Ю. № 12  
 Крикент И. В. № 9  
 Кузьменко А. З. № 11  
 Кузьменко Д. Н. № 10  
 Кулешов В. А. № 9  
 Куренкова В. В. № 2  
 Курынцев С. В. № 4  
 Кусков Ю. М. № 6–7  
 Кучеренко П. П. № 10  
 Кучук-Яценко С. И. № 12  
 Кушнарера О. С. № 2, 5, 6–7  
 Куший А. М. № 6–7  
**Л**анкин Ю. Н. № 9, 11, 12  
 Лебедев В. А. № 8, 9  
 Левченко И. Л. № 8  
 Левченко О. Г. № 6–7, 9  
 Лившиц И. М. № 6–7  
 Липодаев В. Н. № 6–7  
 Лобанов А. И. № 6–7  
 Лобанов Л. М. № 1, 9–11  
 Лотоцкий П. Н. № 5  
 Лохман И. В. № 3  
 Лукьянченко Е. П. № 6–7, 11  
 Лысак В. В. № 9

- Лычко И. И. № 9  
 Лютик Н. П. № 2  
**М**азур А. А. № 6–7, 8, 11  
 Майданчук Т. Б. № 1, 6–7 (2)  
 Макаренко Н. А. № 6–7  
 Маковецкая О. К. № 11  
 Максименко А. А. № 5  
 Максимов С. Ю. № 6–7 (2), 9, 11  
 Максимова С. В. № 4, 10, 11  
 Малахов А. Т. № 6–7  
 Маликов А. Г. № 5  
 Маркашова Л. И. № 2, 5, 6–7 (2), 8  
 Мартыненко В. А. № 8  
 Марунич И. В. № 8  
 Марченко А. Е. № 6–7 (2)  
 Матвиенко М. В. № 8  
 Махлин Н. М. № 1  
 Махненко О. В. № 3, 10, 11  
 Мачуляк В. В. № 6–7  
 Мельник А. Г. № 10  
 Мирзов И. В. № 3, 11  
 Миходуй О. Л. № 11  
 Мищенко Д. Д. № 4  
 Молл Х. № 10  
 Молтасов А. В. № 1, 10  
 Монько Г. Г. № 6–7  
 Морозова Р. И. № 6–7  
 Мотрунич С. И. № 5  
 Мужиченко А. Ф. № 10  
 Мясоед В. В. № 10  
**Н**естеренков В. М. № 2, 3  
 Нетяга В. И. № 6–7  
 Николаев А. К. № 11  
 Нойберт Я. № 4  
**О**лейник О. И. № 5, 11  
 Олейник Ю. В. № 6–7  
 Онацкая Н. А. № 12  
 Оришич А. М. № 5  
 Орлов Л. Н. № 6–7  
 Осечков П. П. № 12  
 Осин В. В. № 12  
 Осипов Н. Я. № 6–7  
**П**авловский В. И. № 9  
 Палиевская Е. А. № 6–7  
 Пальцевич А. П. № 6–7  
 Патон Б. Е. № 6–9  
 Пашуля М. П. № 5  
 Пащин Н. А. № 11  
 Перемитько В. В. № 8  
 Переплетчиков Е. Ф. № 6–7, 12  
 Пестов В. А. № 6–7  
 Петриченко И. К. № 1  
 Петрук В. С. № 6–7, 11  
 Петрушинец Л. В. № 10  
 Письменный А. А. № 1, 10  
 Пичак В. Г. № 9  
 Позняков В. Д. № 5, 6–7  
 Полещук М. А. № 4, 10  
 Полишко А. А. № 3, 11  
 Половинка В. Д. № 12  
 Попов В. В. № 12  
 Прилуцкий В. П. № 9  
 Прокофьев А. С. № 10  
 Проценко Н. А. № 6–7  
 Пузрин А. Л. № 10  
 Пустовой А. Д. № 3, 10  
 Пустовойт С. В. № 6–7, 11  
**Р**етмайер М. № 3  
 Римский С. Т. № 6–7  
 Розерт Р. № 6–7  
 Роянов В. А. № 6–7  
 Рыбаков А. А. № 3 (2)  
 Рябинин В. А. № 11  
 Рябцев И. А. № 5–9, 12  
 Рябцев И. И. № 5  
**С**абадаш О. М. № 11  
 Савицкий А. М. № 8  
 Савицкий М. М. № 8  
 Савченко В. С. № 6–7  
 Саенко В. Я. № 3, 11  
 Симутенков И. В. № 8  
 Самойленко В. И. № 6–7 (2)  
 Самотрясов С. М. № 1, 3, 10  
 Сапрыкина Г. Ю. № 3, 10  
 Севостьянов С. П. № 6–7  
 Селин Р. В. № 1  
 Семенов А. П. № 4, 10  
 Семенов Л. А. № 12  
 Семенов С. Е. № 3  
 Семикин В. Ф. № 12  
 Сидлин З. А. № 6–7  
 Симутенков И. В. № 8  
 Синеок А. Г. № 1  
 Синюк В. С. № 6–7  
 Скорина Н. В. № 6–7  
 Соловей С. А. № 11  
 Соловьев В. Г. № 9  
 Соломийчук Т. Г. № 11  
 Соломка Е. А. № 6–7  
 Стеклов О. И. № 6–7  
 Степанюк С. Н. № 3, 4, 6–7 (2), 11  
 Стефанив Б. В. № 4, 11  
 Стреленко Н. М. № 6–7  
 Судавацова В. С. № 4  
 Суховая Е. В. № 1  
 Сучок А. Д. № 6–7  
 Суший Л. Ф. № 11  
 Сысоев В. Ю. № 3  
**Т**имошенко А. Н. № 9  
 Ткачук В. И. № 12  
 Тороп В. М. № 1  
 Туник А. Ю. № 3, 4  
 Турык Э. В. № 6–7  
**У**далова Е. И. № 2  
 Устинов А. И. № 10  
**Ф**альченко Ю. В. № 5  
 Федотов Д. А. № 2  
 Федорчук В. Е. № 5  
 Филипчук Т. Н. № 3 (2)  
**Х**аскин В. Ю. № 2, 5  
 Хилько А. В. № 6–7  
 Хорунов В. Ф. № 4, 5, 10, 11  
**Ч**айка А. А. № 2, 5, 12  
 Чвертко П. Н. № 1, 3, 10, 12  
 Червяков Н. О. № 6–7  
 Черенда Н. Н. № 8  
 Чернобай С. В. № 12  
 Черняк Я. П. № 9  
**Ш**алимов М. П. № 10  
 Шапка В. А. № 9  
 Швец В. И. № 12  
 Швец Ю. В. № 12  
 Шевцов В. Л. № 10  
 Шелягин В. Д. № 2, 5  
 Шеремета А. В. № 6–7  
 Шинкаренко А. С. № 10  
 Шишкевич А. С. № 1  
 Шлепаков В. Н. № 6–7  
 Шмидт М. № 4  
 Шолохов М. А. № 10  
 Шуба И. В. № 4  
**Ю**щенко К. А. № 6–7 (4), 8, 9  
**Я**вдошин И. Р. № 6–7  
 Якимкин А. В. № 1  
 Яровицын А. В. № 6–7  
 Ярос Ю. А. № 8