

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б. Е. Патон

Ученые ИЭС им. Е. О. Патона

С. И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.),

В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),

Ю. С. Борисов, Г. М. Григоренко,

А. Т. Зельниченко, В. В. Кныш,

И. В. Кривцун, Ю. Н. Ланкин,

Л. М. Лобанов,

В. Д. Позняков, И. А. Рябцев,

В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко

Ученые университетов Украины

М. Н. Брыков, ЗНТУ, Запорожье,

В. В. Дмитрик, НТУ «ХПИ», Харьков,

В. Ф. Квасницкий, НУК, Николаев,

В. Д. Кузнецов, НТУУ «КПИ», Киев

Зарубежные ученые

Н. П. Алешин

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ

Гуань Цяо

Ин-т авиационных технологий, Пекин, Китай

А. С. Зубченко

ОКБ «Гидропресс», Подольск, РФ

М. Зиниград

Ун-т Иудеи и Самарии, Ариэль, Израиль

В. И. Лысак

Волгоградский гос. техн. ун-т, РФ

У. Райсген

Ин-т сварки и соединений, Аахен, Германия

Я. Пилярчик

Ин-т сварки, Гливице, Польша

О. И. Стеклов

РНТСо, Москва, РФ

Г. А. Туричин

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

Редакторы

Т. В. Юштина, Н. А. Притула

Электронная верстка

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

Адрес редакции

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ

03680, Украина, Киев-150,

ул. Боженко, 11

Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277

Факс: (38044) 200 5484, 200 8277

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Учредители

Национальная академия наук Украины,

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ,

МА «Сварка» (издатель)

Свидетельство о государственной

регистрации 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

Издается ежемесячно

СОДЕРЖАНИЕ

Интервью с директором ООО

«НДТ Системз энд сервисез Украина» В.Л. Найдой 3

НОВОСТИ

Разработки ИЭС 7

Новый производитель сварочных проволок в Украине 9

Кафедре сварочного производства НТУУ «КПИ» — 80

*Фомичев С.К., Бойко В.П., Квасницкий В.В., Жданов Л.А.,
Сливинский А.А., Коваленко В.Л.* 80-летие кафедры свароч-
ного производства НТУУ «Киевский политехнический институт» . 11

Кузнецов В.Д., Степанов Д.В. Структура и свойства металла
сварного шва, модифицированного нанокислоти 19

Квасницкий В.В., Ермолаев Г.В., Матвиенко М.В. Влияние
режима охлаждения после диффузионной сварки и пайки
на остаточные напряжения в торцевых соединениях графита
и меди 25

Сливинский А.А., Жданов Л.А., Коротенко В.В. Теплофизи-
ческие особенности импульсно-дуговой сварки неплавя-
щимся электродом в защитных газах (Обзор) 32

*Гринюк А.А., Коржик В.Н., Шевченко В.Е., Бабич А.А., Пеле-
шенко С.И., Чайка В.Г., Тищенко А.Ф., Ковбасенко Г.В.*
Основные тенденции развития плазменно-дуговой сварки
алюминиевых сплавов 39

Пащенко В.Н. Применение газовых систем N–O–C–H для
синтеза упрочняющих компонент в плазменных покрытиях 51

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Червяков Н.О. Оценка термонапряженного состояния в
сварном соединении сплава Inconel 690 57

*Атрошенко М.Г., Полещук М.А., Шевцов А.В., Пузрин А.Л.,
Мищенко Д.Д., Серебряник И.П., Бородин А.И.* Физико-меха-
нические свойства переходной зоны биметалла, полученного
автономной вакуумной напайкой меди на сталь 61

*Молтасов А.В., Гуцин К.В., Клочков И.Н., Ткач П.Н., Тарасен-
ко А.И.* Определение усилия, вызванного нагревом кольцевых
изделий, при контактной стыковой сварке 66

Олейник О.И. Влияние усадки металла продольных
швов муфты на контактное давление при ремонте магист-
рального газопровода 70

ХРОНИКА

III Международная конференция «Сварочные материалы-2015» ... 73

Информация

ОЗСО ИЭС им. Е.О. Патона в цифрах и фактах 74

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

B. E. Paton

Scientists of PWI, Kyiv

S. I. Kuchuk-Yatsenko (vice-chief ed.),

V. N. Lipodaev (vice-chief ed.),

Yu. S. Borisov, G. M. Grigorenko,

A. T. Zelnichenko, V. V. Knysh,

I. V. Krivtsun, Yu. N. Lankin,

L. M. Lobanov,

V. D. Poznyakov, I. A. Ryabtsev,

V. F. Khorunov, K. A. Yushchenko

Scientists of Ukrainian Universities

M. N. Brykov, ZNTSU, Zaporozhje

V. V. Dmitrik, NTU «KhPI», Kharkiv

V. F. Kvasnitskii, NUS, Nikolaev

V. D. Kuznetsov, NTUU «KPI», Kyiv

Foreign Scientists

N. P. Alyoshin

N.E. Bauman MSTU, Moscow, Russia

Guan Qiao

Beijing Aeronautics Institute, China

A. S. Zubchenko

OKB «Gidropress», Podolsk, Russia

M. Zinigrad

College of Judea & Samaria, Ariel, Israel

V. I. Lysak

Volgograd State Technical University, Russia

Ya. Pilarczyk

Welding Institute, Gliwice, Poland

U. Reisinger

Welding and Joining Institute, Aachen, Germany

O. I. Steklov

Welding Society, Moscow, Russia

G. A. Turichin

St. Petersburg State Polytechnical Univ., Russia

Editors

T. V. Yubtina, N. A. Pritula

Electron gallery

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

Address of Editorial Board:

11 Bohdanivska str., 03680, Kyiv, Ukraine

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

Fax (38044) 200 54 84, 200 82 77

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Founders

National Academy of Sciences of Ukraine,

Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine,

IA «Welding» (Publisher)

State Registration Certificate

KV 4788 of 09.01.2001

ISSN 0005-111X

All rights reserved. This publication and
 each of the articles contained herein are
 protected by copyright.

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

Published monthly

CONTENTS

Interview with V.L. Nagda, Director of the LLC

«NDT Systems and Services Ukraine» 3

NEWS

Developments of the PWI 7

New manufacturer of welding wires in Ukraine 9

WELDING PRODUCTION CHAIR of NTUU «KPI» is 80

Fomichyov S.K., Boyko V.L., Kvasnitsky V.V., Zhdanov L.A..

Slivinsky A.A., Kovalenko V.P. 80-year anniversary of Welding

Production Chair of the National Technical University of Ukraine

«Kiev Polytechnical Institute» 11

Kuznetsov V.D., Stepanov D.V. Structure and properties

of weld metal, modified with nanooxidants 19

Kvasnitsky V.V., Ermolaev G.V., Matvienko M.V. Effect of cooling

conditions after diffusion welding and brazing on residual

stresses in edge joints of graphite and copper 25

Slivinsky A.A., Zhdanov L.A., Korotenko V.V. Thermophysical

features of pulsed arc non-consumable electrode welding in

shielding gases (Review) 32

Grinyuk A.A., Korzhik V.N., Shevchenko V.E., Babich A.A.,

Peleshenko S.I., Chaika V.G., Tishchenko A.F., Kovbasenko

G.V. Main tendencies in development of plasma-arc welding

of aluminium alloy 39

Pashchenko V.N. Application of N-O-C-H gas systems for

the stress of hardening components in plasma coatings 51

INDUSTRIAL

Chervyakov N.O. Assessment of thermal stresses state in

welded joint of Inconel 690 alloy 57

Atroshenko M.G., Poleshchuk M.A., Shevtsov A.V., Puzrin A.L.,

Mishchenko D.D., Serebryanik I.P., Borodin A.I. Physical and

mechanical properties of transition zone of bimetal, produced

by autonomous vacuum brazing of copper on steel 61

Moltasov A.V., Gushchin K.V., Klochkov I.N., Tkach P.N., Tara-

senko A.I. Development of foreign apparatus by heating of ring-type

products in flash-butt welding 66

Oleinik O.I. Effect of metal shrinkage of longitudinal welds of

couplings on contact pressure in repair of main gas pipeline 70

NEWS

III International Conference «Welding technologies-2015» 73

Information

Pilot plant of welding equipment of the E.O. Paton Electric Welding

Institute in figures and facts 74

Интервью с директором ООО «НДТ Системз энд сервисез Украина» В.Л. Найдой

Компания ООО «НДТ Системз энд сервисез Украина» приобретает все большую известность как надежный партнер в области создания автоматизированных систем ультразвукового контроля. По итогам работы в 2013–2014 гг. в Украине предприятие награждено международным сертификатом «Экспортер года» как крупный экспортер оборудования автоматизированного УЗ контроля. Главным потребителем продукции компании является металлургическая промышленность.

Специалисты предприятия принимают активное участие в проводимых выставках и конференциях по неразрушающему контролю как в Украине, так и в Европе.



В.Л. Найда — директор
ООО «НДТ Системз энд сервисез Украина»

Владимир Львович, каковы истоки появления Вашей компании в Украине?

Фирма ООО «НДТ Системз энд сервисез Украина» была создана в октябре 2012 г. на базе отдела автоматизированных средств ультразвукового контроля ОКБ Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.

Почему и как это произошло?

На протяжении всей деятельности отдела в ОКБ ИЭС им. Е.О.Патона, а отдел был создан 1984 г. постановлением Президиума АН УССР, мы испытывали постоянные трудности при выполнении работ по крупным контрактам из-за недостатка оборотных средств на изготовление оборудования. Так, например, в 2003 г. был выигран тендер на поставку Выксунскому металлургическому заводу шести установок для УЗ контроля продольных сварных швов и концевых участков труб (в рамках проекта «Северный поток»). Это был большой и интересный проект.

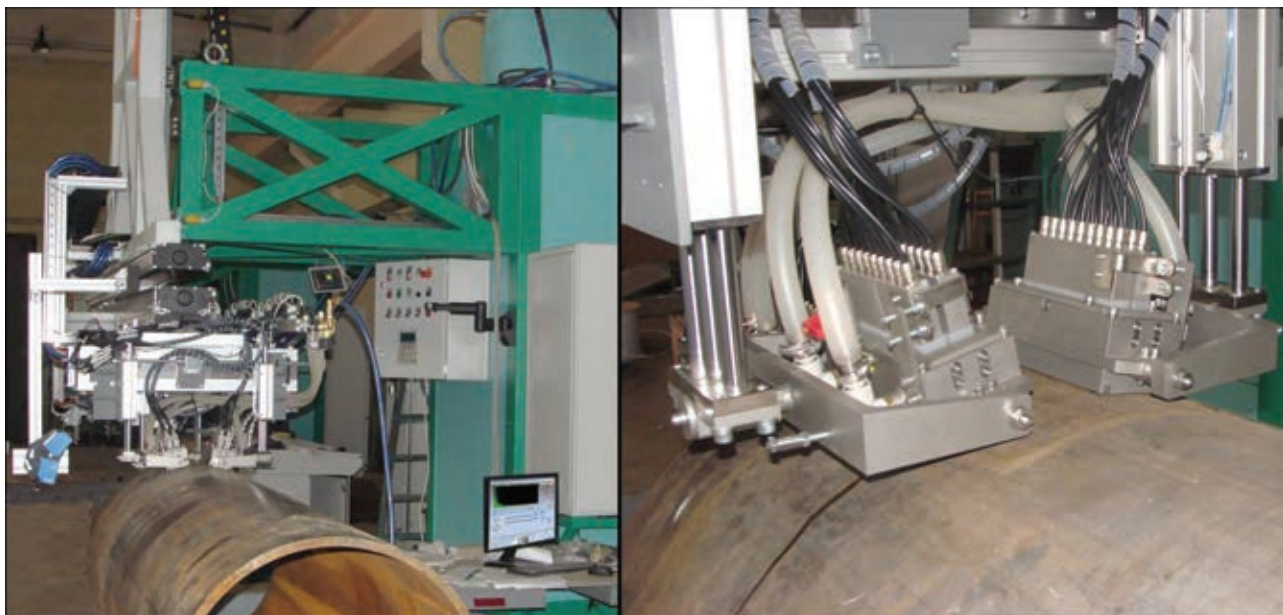
Только благодаря личному участию академика Б.Е. Патона нам удалось решить вопрос, связанный с получением банковской гарантии на авансовый платеж по этому контракту, а затем успешно выполнить работы на Выксунском металлургическом заводе. Все оборудование, поставленное по этому контракту, успешно эксплуатируется и в настоящее время. Позже, уже в 2012 г., мы практически заключили контракт с Волжским трубным заводом на поставку двух установок для автоматизированного УЗ контроля (АУЗК) бесшовных труб по новой технологии (с применением матричных фазированных решеток), но оказалось, что выполнить его мы не можем все по той же причине — невозможность получения банковской гарантии.

И как же дальше развивались события?

То ли случай, то ли некоторое везение, но в этот момент в крупной не-



Презентация нашей новой технологии АУЗК бесшовных труб на международной трубной выставке в Дюссельдорфе, 2014 г.



Установка НК 362МВ для АУЗК концевых участков труб большого диаметра, поставлена на ОАО «Выксунский металлургический завод», 2013 г.

мецкой фирме «NDT Systems & Services GmbH» сменился собственник. Фирма известна в мире как поставщик оборудования для АУЗК листового проката, рельсов в условиях их массового производства, а также услуг по внутритрубной диагностике магистральных нефте- и газопроводов.

Будучи человеком весьма энергичным, он решил расширить сферу своей деятельности за счет трубной тематики, понимая, что в мире работают свыше 500 трубных заводов и контроль качества их продукции является очень важной сферой бизнеса. По данному вопросу были проведены две встречи с Б.Е. Патonom. Учитывая все обстоятельства, было принято решение о создании в Украине специализированного предприятия по автоматизированному УЗ контролю. Учредителем данного предприятия стала фирма «NDT Systems & Services GmbH».

Изменились ли основные направления деятельности? И какой сейчас кадровый состав?

В свое время, будучи отделом ОКБ ИЭС им. Е.О. Патона, мы занимались не только оборудованием по УЗ контролю труб, но и разработками по УЗ контролю железнодорожных колес. Также были реализованы различные проекты в сфере атомной энергетики и оборонного комплекса.

В течении десяти лет мы поставляли на атомные станции Украины вихретоковые зонды и в последующем передали это производство государственному предприятию, входящему в состав НАЭК «Энергоатом».

На сегодняшний день наша деятельность сосредоточена на АУЗК труб (как сварных, так и бесшовных) и железнодорожных колес с ориентацией на российский рынок. К сожалению, украинский рынок оборудования для УЗК в некотором смысле был нами упущен, так как мы были заняты реализацией очень крупных проектов в России. Но наша попытка наладить работу в Украине продолжается. Например, недавно мы провели презентацию наших технологий и оборудования по контролю бесшовных труб в компании «Интерпайп» и передали технико-коммерческое предложение на поставку такого оборудования.

Что касается коллектива. На сегодняшний день в компании работает 21 человек. Она является комплексным подразделением, т.е. включает конструкторский отдел, программистов, акустиков, специалистов по разработке систем управления и автоматики, слесарей-механиков, электромонтажников. Нами выполняется полный цикл как по разработке оборудования, так и по изготовлению, наладке и пуску его у заказчика. Основные направления деятельности сохранились и добавилось новое — изготовление УЗ преобразователей.

Чем это обусловлено?

Налаживание контактов с немецкими партнерами позволило получить нам доступ к новым материалам, которые необходимы для изготовления УЗ преобразователей. Например, композитная керамика позволяет изготавливать УЗ преобразователи ничем не отличающиеся от лучших зарубежных аналогов. Мы организовали у себя производственный участок для их изготовления, закупили необходимое оборудование и к настоящему времени уже являемся серьезным конкурентом ведущим зарубежным фирмам, работающим в этой области.

Сегодня, например, у нас в стадии переговоров контракт с фирмой «Foerster» на поставку УЗ преобразователей для НК листового проката, поставлена небольшая партия преобразователей немецкой фирме «Laubinger». Имеются небольшие заказы от украинских предприятий.

Какие наиболее успешные проекты были реализованы Вами в последние годы?

Очень успешными для нас были 2012–2014 гг. Мы разработали для заводов России и Украины пять установок: две — для Волжского трубного завода для АУЗК бесшовных труб, одну — для Выксунского трубного завода для контроля концевых участков труб большого диаметра (под «Южный поток») и две установки для Харцызского трубного завода (УЗК концевых участков труб и УЗК сварного шва). Четыре установки были успешно запущены, а одна (для Харцызского трубного завода) из-за событий на Донбасе до сих пор не поставлена. Имеем сейчас из-за этого серьезные проблемы.

Насколько усовершенствовались технологии УЗК в этих разработках?

В этих проектах абсолютной новинкой стала разработка и изготовление оборудования для УЗК бесшовных труб. Это связано с тем, что современный уровень нефтегазового комплекса обуславливает необходимость удовлетворения очень высоким требованиям к качеству и надежности потребляемой трубной продукции. Новые месторождения эксплуатируются на все большей глубине в условиях более низких температур. Все это поднимает планку требований к качеству.

Ведущие мировые фирмы «ExxonMobile», «Chevron», «Shell» разработали новые стандарты, в которых оговорены требования по АУЗК бесшовных труб с учетом продольных и поперечных дефектов, а также так называемых «косых» дефектов с углами 22, 45 и 67° по обе стороны относительно образующей трубы. А сейчас, в 2015 г., фирма «ExxonMobile» потребовала обнаруживать «косые» дефекты через каждые 11°.

Это была принципиально новая и сложная для нас работа, которую мы выполняли совместно с французской фирмой «Socomate», поставившей дефектоскопическую аппаратуру. Две такие установки были изготовлены для Волжского трубного завода: одна для концевых участков труб, вторая — для тела трубы. В этих проектах нами впервые была применена технология матричных фазированных решеток. Разработана принципиально новая конструкция акустических блоков с применением полиуретановой мембраны, скользящей непосредственно по поверхности трубы. Сегодня можно с уверенностью сказать, что аналогов такого оборудования в мире нет. Наша установка НК 380Л успешно прошла квалификационные испытания по стандартам фирмы «Shell» и ей выдан соответствующий сер-



Установка НК 368ВЛ для АУЗК концевых участков бесшовных труб, ОАО «Волжский трубный завод», 2014 г.



Установка АУЗК на заводе компании «Laubinger» во время приемочных испытаний, 2014 г.



Сертификат «Экспортер года»

тификат. В этом же году была проведена сертификация нашего оборудования специалистами американской компании «ExxonMobile».

По этой же тематике мы участвовали в тендере, который проводила компания «Valoures Mannesmann» для своего завода в Дюссельдорфе. Но, к сожалению, этот тендер мы проиграли компании GE.

В настоящее время, не имея оборудования, которое позволяет обнаруживать «косые» дефек-

ты, сложно получить заказы от основных мировых потребителей труб. Я предполагаю, что в ближайшее время повсеместно обновятся стандарты, которые ужесточат требования к АУЗК.

За успешную реализацию контрактов в 2013 и 2014 гг. наша компания была отмечена Внешнеторговой палатой Украины — вручением сертификата «Экспортер года».

Попав в новую среду «обитания», мы поняли, что и по профессиональной подготовке, и по ответственному отношению к делу, и по качеству изготовленного оборудования мы не уступаем лучшим зарубежным фирмам, а по срокам изготовления оборудования — превосходим их. Мы освоили современные рациональные подходы к расчету и планированию стоимости контрактов.

Хочу также рассказать о необычном проекте, который был выполнен для немецкой фирмы «Laubinger». Компания «Laubinger», которая изготавливает порталы, движущиеся каретки и другие механические устройства решила попытаться самостоятельно выйти на рынок Германии со своим оборудованием АУЗК. Они изготовили механическую часть установки для контроля труб, мы поставили свой дефектоскоп и акустические преобразователи. Сейчас установка успешно эксплуатируется на одном из трубных заводов «Valoures Mannesmann». В будущем мы сможем поставлять наши специализированные преобразователи для этой установки.

Владимир Львович, в чем на Ваш взгляд сила небольших фирм в конкурентной борьбе с брендами?

Я думаю вот в чем. Крупные компании сами по себе очень инертны. У них есть стабильные заказы и они не очень ориентированы на изменения. Они не хотят делать новое, пока у них покупают старое. А небольшие фирмы, чтобы выжить, стараются как можно быстрее внедрять новые технологические решения. Пример тому — наше оборудование для АУЗК труб на Волжском трубном заводе.

Благодарим Вас, Владимир Львович, за интересную информацию и желаем Вам дальнейших успехов!

Интервью записали А. Зельниченко и В. Липодаев

СВАРЕНО БОЛЕЕ 10 км ШВОВ ПОД ВОДОЙ

Проект строительства в Киеве Подольско-Воскресенского моста через р. Днепр предусматривал возведение четырех временных опор для монтажа мостовых конструкций. Они представляют собой набор из 74 труб диаметром 1420 мм из стали 09Г2С, забитых в дно реки. Для придания опорам необходимой жесткости трубы сваркой связывались между собой горизонтальными и диагональными связями с помощью труб из стали 20 диаметром 520 мм. Три уровня таких связей находятся ниже уровня воды на глубинах 4, 9 и 14 м. Для их обустройства при разработке проекта впервые в отечественной практике мостостроения было принято решение применить подводную сварку.



Узел крепления горизонтальных и диагональных связей к трубе

В отличие от надводной части опоры под водой предстояло дополнительно установить на вертикальную трубу бандаж, приварить его к ней по контуру сверху и снизу. Затем приварить к бандажу косынки и закрепить на них с помощью сварки горизонтальные и вертикальные связи. Толщина металла всех элементов составляла 14 мм. Сварка выполнялась 3-х проходными швами. Всего предстояло сварить более 10000 метров швов во всех пространственных положениях. Учитывая большой объем сварочных работ в ИЭС было подготовлено более 30 водолазов-сварщиков, прошедших курс обучения и получивших допуск к выполнению работ по сварке под водой. На Институт были возложены функции разработки технологии сварки конструктивных элементов опор и проведения водолазами ИЭС контроля качества швов. Сварка выполнялась разработанными в ИЭС электродами ЭПС-АН1 и порошковой проволокой ППС-АН2.

Как уже упоминалось выше, опоры строились как временные, сроком на 1–2 года, но у проектировщиков все равно были сомнения, а выдержат ли швы, сваренные под водой, устоят ли они под натиском льда во время весеннего ледохода. Однако строительство моста затянулось, в следующем году ему будет уже 10 лет, а Патоновские швы стоят, как и прежде.

РУЧНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СВАРОЧНАЯ УСТАНОВКА

В ИЭС им. Е.О. Патона по заказу вагоностроительного завода (г. Чунчунь, Китай) выполнена разработка установки для ручной лазерной сварки изделий железнодорожного транспорта, в частности элементов вагонов современных скоростных железнодорожных поездов. Ручная лазерная сварочная установка управляется одним оператором. Массогабаритные характеристики разработанного инструмента позволяют производить сварку в различных пространственных положениях. Проведенные металлографические исследования и механические испытания сварных швов, полученных при использовании разработанного ручного лазерного инструмента, показали, что механические характеристики данных сварных соединений не уступают характеристикам соединений, полученных с помощью автоматической лазерной сварки.



СИСТЕМА ДАЛЬНОДЕЙСТВУЮЩЕГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НАПРАВЛЕННЫМИ ВОЛНАМИ

В Институте электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины разработаны низкочастотные ультразвуковые комплексы для определения коррозионного износа трубопроводов диаметром до 330 мм («Универсал-1П») и до 630 мм («Универсал-2П»), которые успешно применяются для диагностирования ответственных промышленных объектов (нефте-, газопроводы, технологические трубопроводы, теплотрассы). Их неоспоримое преимущество — это возможность достаточно быстро выявлять критические участки трубопроводов в недоступных (под землей) или труднодоступных (воздушные переходы) местах.

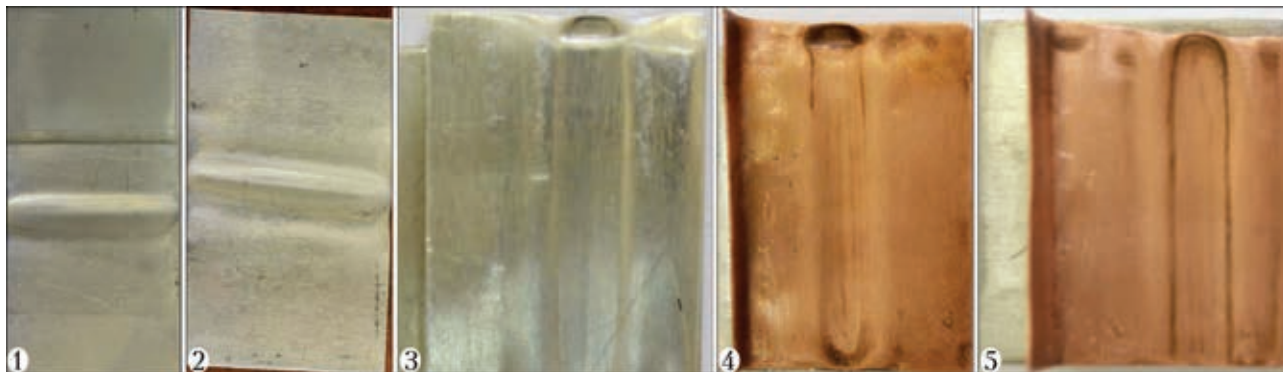
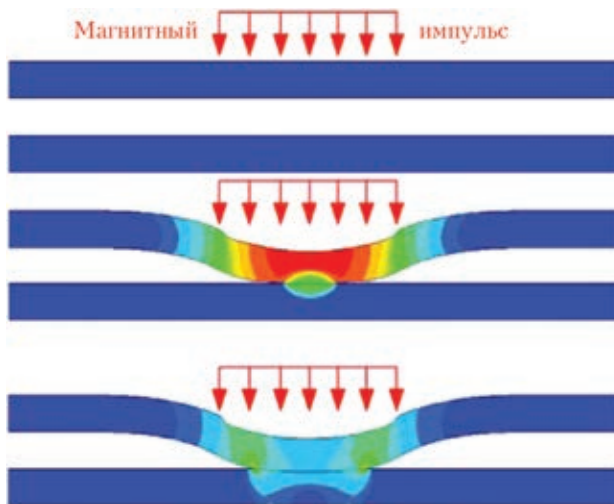
В настоящее время проводятся исследования для развития данной технологии в направлении оценки старения металла на основе анализа его упругих характеристик с использованием балльной системы оценки состояния объектов для определения условий и допустимости их дальнейшей эксплуатации. Результаты данной работы уже нашли практическое применение при диагностировании состояния трубопроводов теплотрассы Института коллоидной химии НАН Украины.



МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ СВАРКА ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В ИЭС им. Е.О. Патона установлена принципиальная возможность получения неразъемных соединений плоских изделий из различных металлов (сталь, Cu, Al) в однородном и разнородном вариантах с использованием концентрированного импульсного магнитного поля (магнитно-импульсная сварка).

Соединения были выполнены с использованием стального индуктора специальной конструкции на модернизированной установке для магнитно-импульсной сварки Н-126, предназначенной для сварки деталей типа тел вращения, и специальной оснастки. Сварные соединения выполнены на плоских образцах алюминий–алюминий (1), алюминий–медь (2), алюминий–нержавеющая сталь (3), медь–алюминий (4), медь–нержавеющая сталь (5).



Новый производитель сварочных проволок в Украине



А.Н. Алимов

Производство металлоконструкций специального назначения из высоколегированных коррозионностойких, жаропрочных, теплоустойчивых и высокопрочных сталей развивается опережающими темпами во всем мире. Это обусловлено развитием технологий в нефтехимической промышленности, энергетике, строительной индустрии, интенсификацией эксплуатации транспорта, стремлением конструкторов уменьшить вес и габариты металлоконструкций. При изготовлении и ремонте таких металлоконструкций основным технологическим процессом сварки по-прежнему является дуговая сварка плавящимся электродом: сварка в защитных газах и сварка под флюсом.

В структуре украинских производителей сварочных проволок для всех способов дуговой сварки, в том числе проволок для производства штучных электродов, присутствуют только производители проволок из низкоуглеродистых и некоторых марок низколегированных сталей. Производство проволок специального назначения — высоколегированных коррозионностойких, жаропрочных, на основе никеля, высокопрочных и др. до недавнего времени в Украине отсутствовало. Все типы вышеуказанных проволок импортировались из Китая, Индии, России, Италии и других стран.

В 2010 г. группа энтузиастов из г. Боярка (пригород Киева) приняла решение организовать у себя современное производство сварочных проволок специального назначения. В группу входили выпускники кафедры сварки Киевского политехнического института, имевшие опыт работы в ИЭС им. Е.О. Патона и на производстве сварочных материалов, бизнесмены, финансисты. После детального изучения украинского рынка высоколегированных коррозионностойких, жаропрочных и других специальных проволок (в том числе сварочных), составления детализированного бизнес-плана, выбора производственной площадки, подготовки инженерных сетей и коммуникаций команда приступила к реализации проекта. В процессе подготовки проекта были проанализированы новейшие достижения технологии переработки проволоочных продуктов, а именно особенности подготовки катанки к волочению, влияние различных видов волочильного инструмента и технологических материалов на качество поверхности производимой проволоки, виды обработки поверхности готовой проволоки для удовлетворения ожиданий потребителей, привыкших работать с проволокой, которая соответствует требованиям европейских и американских стандартов. Особое внимание на этом этапе подготовки проекта к реализации уделялось энергоэффективности производственных процессов, а также минимизации или полному исключению вредного воздействия будущего производства на окружающую среду. Технологическая схема производства и состав оборудования технологических линий выбирались только с учетом достижения максимально возможных на сегодняшний день потребительских характеристик готовой проволоки.

В результате анализа предложений поставщиков оборудования на основе детально разработанной технологической схемы производства из нескольких потенциальных изготовителей был выбран один основной производитель — известная компания Lamnea Brük и несколько субпоставщиков ряда вспомогательных устройств из Германии, Италии, Австрии, США, Индии. Следует отметить, что различные вспомогательные устройства являются ключевыми элементами технологической цепочки в производстве высоколегированных проволок и проволок специального назначения. Без специализированных дополнительных устройств линия волочения способна обеспечить производство только проволок общего назначения.

Все потенциальные производители и поставщики технологического оборудования были предварительно проинспектированы (посещение и аудит производства) с целью получения информации о техническом уровне и эксплуатационных характеристиках предлагаемого оборудования, его надежности, удобстве в обслуживании, безопасности эксплуатации. В итоге удалось объединить в одной производственной линии все лучшие известные на сегодняшний день технические решения в производстве проволок специального назначения.





Начало производства было организовано компанией ВИТАПОЛИС, которая приступила к выпуску товарной проволоки в июле 2015 г. При этом проволокам была присвоена зарегистрированная торговая марка ХОРДА.

Пуско-наладочные работы при запуске линии в эксплуатацию мы выполняли с использованием катанки Св-08ГС и Св-08Г2С. В результате испытаний полученных проволок общего назначения оказалось, что эти проволоки, изготовленные по нашей технологической схеме, по своим сварочно-технологическим свойствам ничем не уступают таким известным маркам проволоки как AristoRod 12.50 (ESAB) и EMK-6 Top (Böhler).

Наша производственная линия в состоянии качественно и с высокой стабильностью подготовить к волочению и очистить поверхность катанки, которая имеет

трудноудаляемую окалину или незначительные непредвиденные загрязнения, возможные отклонения диаметра, овальность и др. При этом уже на входе в первый волочильный блок поверхность катанки имеет характерный, равномерный металлический блеск как после шлифовки абразивным инструментом. На выходе из первого волочильного блока с вращающейся волокой овальность проволоки не превышает 0,01 мм, а ее поверхность является исключительно гладкой. Дальнейшее волочение проволоки выполняется с использованием водорастворимых стеаратов натрия, кальция и волочильного инструмента компаний Bremer и Paramount. Финишная подготовка волочильного инструмента выполняется в нашей фильерной мастерской на полуавтоматической машине компании Bremer.

Остатки волочильной смазки удаляются с поверхности готовой проволоки горячей водой под высоким давлением, после чего проволока дополнительно полируется, а на ее поверхность наносится тонкий слой антифрикционного токопроводящего покрытия, содержащего ингибитор коррозии. Готовая проволока наматывается в стандартные потребительские катушки диаметром 200, 300 или 415 мм, упаковывается в пластиковые пакеты и картонные коробки. По желанию потребителя, проволока может дополнительно упаковываться в вакуумные пакеты.



Следует отметить, что в производстве широкой номенклатуры проволок специального назначения, в том числе предназначенных для сварки низколегированных и высокопрочных сталей, высоколегированных коррозионно-стойких и жаропрочных сталей, сплавов на основе никеля, броневых сталей необходим тщательный мониторинг и контроль всех этапов технологического процесса.

Для этих целей на предприятии ВИТАПОЛИС с первых дней функционирует контрольно-измерительная лаборатория, которая имеет в своем составе комплекс оборудования и набор приспособлений для механических испытаний, химического анализа, металлографических исследований сырьевых материалов и готовой продукции. Участок сварочно-технологических испытаний укомплектован постами полуавтоматической сварки в защитных газах и механизированной сварки под слоем флюса.

Особое внимание перед началом производства мы уделили подготовке производственного персонала, понимая, что даже на самом лучшем оборудовании можно изготовить продукцию высокого качества и соответствующих потребительских свойств только в случае его эксплуатации обученными, квалифицированными рабочими. Наши инженеры подробно описали все элементы технологического процесса в тесном сотрудничестве с изготовителями оборудования, технологами из Германии, Швеции и Австрии. Все рабочие после конкурсного отбора прошли производственное обучение непосредственно на нашем предприятии, в соответствии с разработанными технологическими и рабочими инструкциями. Введена персональная ответственность каждого работника за выполняемую технологическую операцию с учетом и документированием выполненных работ. На предприятии действует система менеджмента качества соответствующая ISO 9001.

В октябре 2015 г. компания ООО «ВИТАПОЛИС» представила свою продукцию на Международной выставке «Зброя та безпека-2015» (г. Киев), которая вызвала заметный интерес у представителей предприятий оборонно-промышленного комплекса Украины и ряда зарубежных стран.

К настоящему времени выполнены первые заказы по поставкам сварочных проволок на ООО «Фрунзе Электрод», МВП «Гефест» и др. Сегодня производственные мощности предприятия позволяют выпускать около 100 т сварочной проволоки в месяц 15 различных марок. Инвестиционная программа предприятия предусматривает в 2016 г. постановку на производство еще около 30 марок проволоки.

А.Н. Алимов, технический директор ООО «ВИТАПОЛИС»

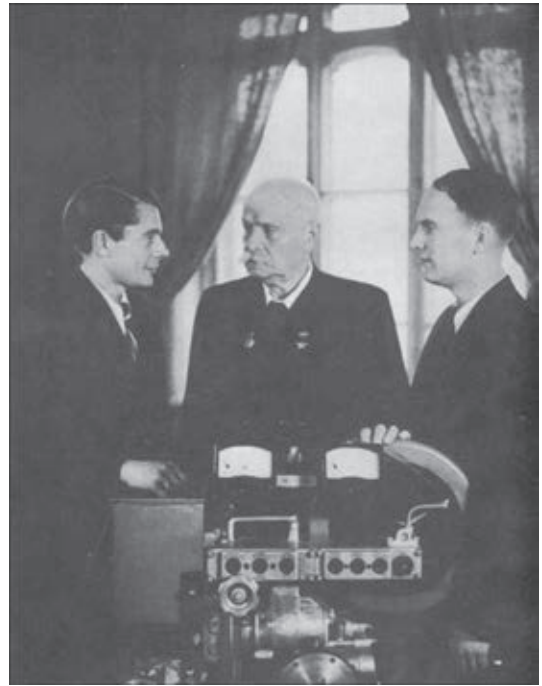
80-летие КАФЕДРЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА НТУУ «КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

В 1935 г. по инициативе выдающегося ученого и инженера академика АН УССР Евгения Оскаровича Патона на механическом факультете Киевского политехнического института была создана кафедра сварочного производства и организована подготовка инженеров-механиков по специальности «Оборудование и технология сварочного производства». Необходимость подготовки специалистов такого профиля была вызвана потребностями интенсивного развития отечественной промышленности, транспорта, строительства и многих других отраслей народного хозяйства. Путем перевода студентов с других специальностей были сформированы первые группы студентов для подготовки инженеров сварщиков на втором и третьем курсах обучения. Первый выпуск инженеров сварочной специальности (17 человек) состоялся уже в 1938 г. и за 3 года было подготовлено 104 специалиста-сварщика.

Активное участие в учебном процессе на кафедре в те годы принимали многие научные сотрудники организованного в 1934 г. Института электросварки АН УССР, в частности, В.И. Дятлов, В.В. Шеверницкий, А.М. Сидоренко, Ф.Е. Сороковский. Для преподавания профилирующих дисциплин были приглашены также сотрудники других кафедр института — доценты И.П. Трочук и Н.В. Пинес, ассистент Г.К. Блаудзевич и главный металлург авиационного завода М.М. Борт. Кафедре было выделено необходимое количество помещений для проведения учебного процесса и выполнения научно-исследовательских работ. Именно на этом этапе проходило формирование новой инженерной специальности — «Оборудование и технология сварочного производства». Впервые были разработаны методологические основы подготовки инженеров-сварщиков, включающие комплексную систему образования, которая базируется на неразрывной связи учебного заведения и производства.

С начала создания кафедры ею заведовал академик Е.О. Патон. Однако большая загруженность как директора Института электросварки затрудняла ему работу в КПИ и в 1938 г. он был вынужден оставить вуз, но и в дальнейшем оказывал кафедре разностороннюю помощь, неизменно воплощая в жизнь заложенную изначально идею родственности и сотрудничества обеих организаций.

Евгений Оскарович был выдающимся ученым и педагогом, что весьма благотворно влияло на качество подготовки специалистов-сварщиков. В те годы



Основатель кафедры академик Е.О. Патон с сыновьями Владимиром (слева) и Борисом (справа) возле нового универсального сварочного автомата ТС-17 (1949 г.)

Е.О. Патон в основу подготовки инженеров по сварке были положены важные методологические принципы, состоящие в необходимости сочетания теоретической и практической подготовки студентов, в подчинении содержания подготовки специалистов практическим задачам развития сварочного производства, в высокой требовательности к работе студентов над учебным материалом, в широком использовании для обучения современных достижений сварочной науки и техники. Эти принципы научно-педагогический коллектив кафедры бережно хранит и в настоящее время.

В 1938 г. заведующим кафедрой стал доц. В.Л. Уласик. Начавшаяся в 1941 г. война прервала подготовку специалистов по сварке. Киевский политехнический институт был эвакуирован в г. Ташкент. Многие преподаватели, сотрудники, аспиранты и студенты были мобилизованы, часть перешла на заводы, выпускавшие оборонную продукцию. В связи с отсутствием преподавательских кадров подготовка инженеров для сварочного производства в Ташкенте не осуществлялась.

В 1944 г., после возвращения КПИ из эвакуации в Киев, кафедра сварочного производства сразу же возобновила свою деятельность. С июля по ноябрь 1944 г. кафедрой заведовал проф. Г.И. Погорин-Алексеев, а затем с конца 1944 г. по 1947 г.

— доц. И.П. Трочун и непродолжительный период в 1947 г. доц. М.Н. Гапченко и асс. М.М. Борт. Сильно ощущалась нехватка квалифицированного научно-педагогического персонала. Тем не менее сотрудники и студенты кафедры в короткие сроки сумели восстановить разрушенные во время войны учебные помещения и лаборатории. Кафедра была оснащена необходимым сварочным оборудованием. В результате фактически была создана новая учебно-лабораторная база общей площадью около 700 м². Первый послевоенный выпуск инженеров-механиков по специальности «Оборудование и технология сварочного производства» состоялся в 1947 г. Это стало возможным благодаря большому вкладу академика К.К. Хренова, заведовавшего кафедрой с 1947 по 1957 гг. После К.К. Хренова кафедрой заведовали проф. И.П. Трочун (1957–1967 гг.) и проф. В.И. Дятлов (1967–1969 гг.). С 1965 г. на кафедре открыта подготовка инженеров-электромехаников по специальности «Электротермические установки» со специализацией в области электросварочных установок.

В 1969 г. на должность заведующего кафедрой (по совместительству) был приглашен заведующий отделом Института электросварки д-р техн. наук проф. Б.С. Касаткин, который руководил кафедрой до июня 1972 г. Это способствовало существенному расширению и укреплению всестороннего творческого сотрудничества между кафедрой и ИЭС им. Е.О. Патона, особенно в области научных исследова-

ний. Заметно оживились хозяйственные научно-исследовательские работы, подготовка научных кадров через аспирантуру и путем соискательства. В то же время все более заметно ощущались трудности, связанные с ограниченностью учебно-лабораторной и научной базы кафедры.

В начале 1970-х годов правительство Украины приняло решение о создании на базе КПИ и Института электросварки Учебного центра по совместной подготовке и повышению квалификации инженеров-сварщиков. Был построен новый учебно-лабораторный корпус (сейчас это корпус 23-й НТУУ «КПИ») площадью 6000 м². В сентябре 1977 г. кафедра переехала в новые учебно-лабораторные помещения, оснащенные современным оборудованием и приборами. Для преподавательской работы на кафедру на условиях совместительства приглашались ведущие ученые Института электросварки: Г.И. Лесков, А.И. Чвертко, А.Г. Потапьевский, В.Р. Рябов, В.Н. Замков, В.Э. Моравский, В.И. Махненко, Б.А. Мовчан, А.А. Россошинский и др.

С 1972 по 1974 гг. кафедрой заведовал д-р техн. наук проф. М.Н. Гапченко, а с 1974 г. ее возглавлял д-р техн. наук проф. И.Р. Пацкевич.

С 1962 по 1978 гг. под руководством В. П. Черныша на кафедре проводили работы по созданию методов магнитного управления кристаллизацией металла сварочной ванны сварных швов (В.П. Черныш, В.В. Сыроватка, И.В. Малинкин, В.Д. Куз-



Открытие памятника академику Е.О. Патону в НТУУ «КПИ»

нецов и др.). Полученные результаты подтвердили возможность активного воздействия на процесс первичной кристаллизации путем электромагнитного перемешивания сварочной ванны и показали, что перемешивание приводит к измельчению структуры металла шва, изменению глубины и формы провара.

В 1978 г. из кафедры сварочного производства выделяется кафедра сварочного оборудования под руководством д-ра техн. наук проф. В.П. Черныша, на которой были продолжены работы по управлению кристаллизацией металла сварочной ванны с помощью магнитного воздействия, получившие дальнейшее развитие в трудах д-р техн. наук Р.Н. Рыжова, канд. техн. наук В.А. Пахаренко и др.

С мая 1989 г. по 27 апреля 2015 г. кафедрой сварочного производства заведовал д-ра техн. наук проф. В.М. Прохоренко (выпускник кафедры 1962 г.).

В 1991 г. из кафедры сварочного производства выделяется кафедра восстановления деталей машин, которой в то время заведовал канд. техн. наук доц. В.М. Духно, а с октября 1993 г. ее возглавляет д-р техн. наук проф. В.Н. Корж. Ей была поручена подготовка специалистов по специальности «Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановления деталей машин». В настоящее время кафедра носит название инженерии поверхности и заведует кафедрой д-р техн. наук проф. В.Д. Кузнецов.

На базе кафедры сварочного производства КПИ в 1975 г. возобновил работу сварочный факультет, деканом которого до 2002 г. был выпускник кафедры сварочного производства 1960 г. профессор А.М. Сливинский. С 2002 г. по настоящее время сварочным факультетом руководит д-р техн. наук проф. С.К. Фомичев, возглавляющий кафедрой электросварочных установок с 2001 г.

Ныне факультет состоит из трех специальных кафедр: сварочного производства, электросварочных установок, инженерии поверхности. Факультет готовит бакалавров по направлению «Сварка», а также специалистов по специальностям «Оборудование и технологии сварочного производства», «Сварочные установки», «Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановления деталей машин» и магистров в области сварочной науки и техники на основе бакалаврской подготовки. В настоящее время на факультете обучается около 400 студентов. Кроме подготовки студентов ученые факультета выполняют широкий спектр научных исследований по наиболее актуальным современным научным направлениям.

На территориальной базе корпуса сварочного факультета в 1977 г. был создан учебный центр сварки, при котором открылся семинар ЮНИДО и курсы повышения квалификации отечественных

специалистов в области сварки и неразрушающего контроля сварных соединений, курсы подготовки рабочих-сварщиков. Активное участие в работе Учебного центра сварки принимает и кафедра сварочного производства. В настоящее время это направление активно реализуется в программе двойного диплома — международного инженера по сварке (IWE), международного технолога по сварке (IWT) и международного инспектора по сварке (IWI) (согласно стандарта ДСТУ ISO 14731:2008). Данный диплом реализуется на базе сварочного факультета, а преподаватели кафедр сварочного факультета составляют рабочую группу по подготовке специалистов на базе лабораторий кафедры.

В конце 1994 г. по инициативе декана сварочного факультета А.М. Сливинского и Общества сварщиков Украины общим приказом Национальной Академии наук Украины и Министерства образования Украины был создан Украинский аттестационный комитет сварщиков (УАКС). Его техническим директором стал канд. техн. наук, доц. кафедры сварочного производства В.Т. Котик. За время деятельности УАКС в Украине подготовлено и аттестовано более 700 экспертов и открыто более 230 комиссий по аттестации сварщиков. Созданные УАКС базы данных по аттестационным комиссиям и аттестованным сварщикам (ежегодно аттестуется около 10000 чел.) позволяют оперативно контролировать процессы аттестации, а также получать информацию по состоянию и динамике развития сварочного производства в Украине. Таким образом, созданная система аттестации сварщиков в Украине показала свою необходимость, актуальность и эффективность, обеспечивая высокое качество сварочных работ.

С момента основания широкое развитие на кафедре получает научно-исследовательская работа. Организована и успешно функционирует аспирантура. Аспиранты и многие сотрудники кафедры защищают кандидатские диссертации. Преподаватели кафедры опубликовали ряд книг, получивших широкую известность. На кафедре сложились стабильно развивающиеся научные направления. В частности, коллектив кафедры под общим руководством академика К.К. Хренова выполнил ряд работ, связанных с исследованием сварочной дуги (В.Э. Моравский, Г.Б. Сердюк, Г.В. Васильев, Л.А. Бялоцкий). В 1949 г. К.К. Хренов опубликовал фундаментальную монографию «Электрическая сварочная дуга», ставшую первым обобщающим трудом по данному вопросу. Данные работы по изучению дугового разряда были продолжены на новом качественном уровне с использованием электронного осциллографирования дуги с целью изучения переходных процессов (Л.А. Жданов, В.Л. Коваленко). Результаты



Коллектив кафедры сварочного производства (сентябрь 2015 г.)

этих исследований отражены в кандидатской диссертации В.Л. Коваленко (2013 г.). В результате предложен новый комплексный критерий оценки стабильности существования дугового разряда, который включает энергетические и технологические характеристики дуги, объяснены особенности существования дуги переменного тока.

Следующим востребованным направлением научной деятельности кафедры было создание новых оригинальных шлаковых систем для керамических флюсов и разработка их составов, предназначенных для сварки и наплавки, а также технологии изготовления керамических флюсов (Д.М. Кушнерев, И.М. Жданов, М.П. Гребельник и др.). Результаты исследований, посвященных разработке и применению керамических флюсов, изложены в монографии К.К. Хренова и Д.М. Кушнерева «Керамические флюсы», изданной в 1954 г. Работы были продолжены в 1970–2015 гг. А.М. Сливинским, В.Н. Коперсаком, В.И. Прохоровым, В.Т. Котиком, О.А. Гаевским, Л.А. Ждановым, Н.М. Стреленко. За это время был разработан уникальный керамический флюс для сварки металла после газо-кислородной резки (А.М. Сливинский, В.Т. Котик), плавный флюс для сварки низкоуглеродистых сталей повышенной прочности АН-44 (А.М. Сливинский, В.М. Прохоров, В.Н. Коперсак), плавный флюс для наплавки АН-69 (А.М. Сливинский, Л.А. Жданов), агломерированный флюс АНК-45 (совместно с отд. № 15 ИЭС им. Е.О. Патона) и флюс для наплавки АНК-73 (Л.А. Жданов, Н.М. Стреленко). Результаты работы отражены в многочисленных публикациях и защищены авторскими свидетельствами и патентами Украины.

Разработка оригинальных технологий наплавки режущего инструмента, изношенных деталей машин и механизмов также является важнейшим направлением работы кафедры сварочного производства. Нельзя не отметить труды В.Д. Кузнецова, Н.А. Горпенюка, Ю.А. Юзвенко, М.С. Самотрясова, Б.Н. Горпенюка.

Важные работы по теоретическим проблемам сварки выполнены под руководством В.И. Дятлова, который в 1963 г. защитил докторскую диссертацию по этим направлениям. К ним относятся оригинальные разработки в области теории свободно расширяющейся и сжатой сварочной дуги, расчета режимов автоматической сварки под флюсом, переноса электродного металла и целый ряд других исследований. Теоретические модели В.И. Дятлова по дуговым процессам, переноса электродного металла, металлургического взаимодействия при сварке под флюсом не потеряли своей актуальности и в настоящее время. Д-р техн. наук проф. В.И. Дятлов занимался не только сваркой плавлением, но и сваркой в твердом состоянии. Под его руководством на кафедре выполнена кандидатская диссертация по диффузионной сварке в тлеющем разряде магнитных и немагнитных сталей Д.И. Котельниковым, который позже защитил и докторскую диссертацию по этой же тематике.

Под руководством М.Н. Гапченко на кафедре выполнен ряд работ, направленных на изучение свариваемости, хрупкого разрушения металлов и совершенствование технологии сварки сталей и сплавов. Результаты исследований обобщены в монографии М.Н. Гапченко «Хрупкие разрушения сварных соединений и конструкций», а также в его докторской диссертации, защищенной в 1969

г. В дальнейшем исследования технологической прочности и свариваемости продолжены А.А. Сливинским для никелевых сплавов, а также нержавеющей и высокопрочных сталей. Результаты этих исследований в 1998–2015 гг. опубликованы в многочисленных статьях, в том числе и зарубежных, а также вошли в учебное пособие «Свариваемость конструкционных материалов».

Большое развитие в 1950–1960 годы получили работы в области газопламенной обработки металлов, проводившиеся под руководством М.М. Борты и А.Д. Котвицкого. Особенно следует отметить кислородную резку при низком давлении металла больших толщин, пакетную резку металла, разработку целой серии установок для резки круглого профиля, прибылей стального литья, горячего проката и др. Были созданы принципиально новые типы резаков, которые нашли широкое применение в промышленности. Разработку плазменных процессов сварки, наплавки и резки материалов возглавлял М.Н. Гапченко. Значительные результаты были получены под руководством В.Н. Коржа в области создания оборудования и технологии для сварки с применением водородно-кислородного пламени. Материалы этих исследований легли в основу докторской диссертации В.Н. Коржа, защищенной в 1991 г.

Работы в области сварочных напряжений и деформаций развивались под руководством И.М. Жданова и И.П. Трочуна, которые разработали простые и наглядные методы инженерных расчетов сварочных напряжений и деформаций в металлоконструкциях. Основные результаты этих исследований изложены в монографии И.П. Трочуна «Внутренние усилия и деформации при сварке». Широко развивались в 1960-е годы проводившиеся под руководством И.М. Жданова исследования термомеханических процессов при сварке (работы И.М. Жданова, И.М. Чертова, Е.А. Коршенко, В.М. Прохоренко, А.С. Карпенко, В.Н. Коржа, Б.В. Медко, А.К. Гончара и др.). Основные направления исследований — изучение закономерностей формирования деформаций и напряжений в процессе сварки, закономерностей хрупкого разрушения, создание новых экспериментальных методов исследований и приборов, разработка способов уменьшения остаточных напряжений и деформаций.

Результаты исследования влияния напряженно-деформированного состояния сварных конструкций на хрупкое разрушение сварных соединений отражены в докторской диссертации В.М. Прохоренко «Методы расчета коэффициентов интенсивности напряжений и раскрытия трещин в сварных соединениях с учетом остаточных напряжений», защита которой состоялась в 1989 г. Дальнейшие исследования напряженного

состояния сварных конструкций выполнялись в направлении разработки новых инженерных методов расчета, основанных на современных представлениях о кинетике деформаций при сварке. Результатом указанных исследований стала кандидатская диссертация Д.В. Прохоренко. Описанные выше научные результаты частично вошли в учебные пособия «Напряжения и деформации при сварке» авторов Б.С. Касаткина, В.М. Прохоренко, И.М. Чертова, а также «Напряжения и деформации в сварных соединениях и конструкциях», авторы В.М. Прохоренко, Д.В. Прохоренко, изданные соответственно в 1987 г. и 2009 г. В последние годы исследование напряженно-деформированного состояния при сварке успешно продолжается молодым поколением исследователей Д.В. Прохоренко и А.А. Перепичаеми численными методами математического моделирования на основе метода конечных элементов. В частности, ими были выполнены моделирование напряженно-деформированного состояния магистрального трубопровода в месте ремонта трещиноподобного дефекта, исследование термомеханических процессов при наплавке сварного шва на поверхность полубесконечного тела, расчет напряжений и деформаций для различных технологических схем сварки стыковых соединений из тонкого металла. Одним из результатов этих исследований стала кандидатская диссертация А.А. Перепичаеми.

В 1980-е годы на кафедре возникли новые научные направления. Под руководством И.Р. Пацкевича началась разработка вопросов технологии сварки чугуна и исследования поверхностных явлений при сварке. Изучены смачиваемость и растекание разнообразных пар жидких металлов в изотермических и неизотермических условиях. Определено влияние внешних воздействий на указанные явления. Результаты этих работ изложены в монографии И.Р. Пацкевича, В.Р. Рябова и Г.Ф. Деева «Поверхностные явления в металлах при сварке» (1991 г.). Их работы продолжил В.П. Бойко, создавший уникальную экспериментальную установку для исследования высокотемпературных процессов смачивания и межфазного взаимодействия на границе газ-шлак-металл. По результатам исследований опубликованы многочисленные научные работы. Методы повышения точности изготовления сварных конструкций интенсивно разрабатывались под руководством И.М. Жданова. Работы были продолжены В.В. Лыском. По результатам работы защищена кандидатская диссертация и разработан оригинальный способ сварки тонколистового материала.

Много интересных результатов получено В.В. Батюком с сотрудниками кафедры (Б.А. Бобинным, С.Н. Минаковым, И.Н. Гришой и др.) в направлении разработки приборов и технологии не-

разрушающего контроля остаточных сварочных напряжений в различных сварных конструкциях.

Исследования в области температурного режима сварочной ванны и капель электродного металла выполнены В.М. Духно и С.М. Гетманцем, которые в дальнейшем легли в основу кандидатской диссертации и внесли существенный вклад в изучение теплосодержания капель электродного металла и ванны при аргонодуговой сварке.

С конца 1980-х годов на кафедре под руководством С.К. Фомичева выполнен большой комплекс работ по повышению коррозионной прочности сварных конструкций, материалы этих исследований легли в основу докторской диссертации, защищенной им в 1994 г. С 1987 г. на кафедре под руководством И.П. Белокура интенсивно разрабатываются вопросы дефектоскопии и контроля качества сварных соединений. Результаты исследований в данном направлении отражены в докторской диссертации, защищенной И.П. Белокуром в 1991 г., и в его многочисленных публикациях.

С 1990-х годов на кафедре активно развивается направление, связанное с разработкой систем автоматизированного проектирования технологических процессов сварки плавлением с применением компьютерной техники. Под руководством И.Ф. Коринца и при участии В.П. Бойко, Ю.И. Охая разработаны математические модели плавления основного металла сталей и титана, плавления сплошных, порошковых проволок, нагрева покрытых электродов. В результате были разработаны оригинальные методики расчета режимов механизированной и автоматической дуговой сварки в защитных газах и под флюсом.

Современные научно-технические направления кафедры сварочного производства

Научные направления кафедры формировались в условиях тесных творческих связей с Институтом электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины при участии не только ведущих ученых института, но и лично Бориса Евгеньевича Патона. Директор ИЭС и Президент НАН Украины академик Б.Е. Патон лично помогал в решении вопросов развития материально-технической базы, подготовки научных кадров кафедры и решении стратегических задач развития сварочного производства. Ниже рассмотрены основные проблемные направления работы кафедры.

Технология и металлургические процессы при электродуговой сварке:

– создание теоретических моделей расчета состава газовой фазы, влияния сварочных материалов на состав металла шва, содержания в нем газов и неметаллических включений при дуго-

вой сварке на базе физико-термодинамического моделирования;

– исследование металлургических процессов при сварке и разработка новых плавленных, агломерированных флюсов и порошковых проволок для сварки и наплавки;

– изучение склонности металла шва к образованию трещин на базе технологических проб;

– исследование дугового разряда при сварке и его технологических характеристик на базе комплексных коэффициентов стабильности и переходных процессов с использованием синергетических источников питания;

– исследование и моделирование особенности порообразования при сварке;

– моделирование тепловых процессов электродуговой сварки;

– исследование влияния термомеханических циклов сварки на фазовый состав и структуру металла сварного соединения;

– технологические особенности сварки модулированным током с синергетическим регулированием дуги;

– создание математических моделей плавления основного и электродного металла при дуговой сварке плавлением и на их основе оптимизация процессов сварки в защитных газах.

Напряжения и деформации при сварке:

– моделирование и расчет методом конечных элементов сварочных напряжений, деформаций и перемещений элементов сварных конструкций на основе современных компьютерных технологий;

– исследование влияния технологических схем сварки на остаточные перемещения продольной оси сварных конструкций и разработка оптимальной технологической последовательности их сварки;

– моделирование напряженно-деформированного состояния свариваемых конструкций для лучевых и дуговых способов сварки;

– определение погонной энергии тепловой правки сварных одномерных конструкций инженерными расчетными методами.

Диффузионная сварка и пайка металлов, сплавов и композиционных материалов:

– математическое моделирование термомеханических процессов при диффузионной сварке и пайке;

– разработка технологий диффузионной сварки и пайки с управляемым напряженно-деформированным состоянием;

– исследование влияния модифицирования поверхностей высококонцентрированными потоками энергии на свойства диффузионно-сварных и паяных соединений;

– создание новых материалов для получения диффузионно-сварных и паяных соединений.

Активное развитие направления обеспечивает благодаря поддержке руководства и сотрудников ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, в частности, академиков НАНУ К.А. Ющенко и И.В. Кривцуна, члена-корреспондента НАНУ В.Ф. Хорунова, сотрудников Национального университета кораблестроения (г. Николаев). Большой вклад в проведение работ по управлению напряженно-деформированным состоянием в процессе получения соединений в твердом состоянии внес академик НАНУ В.И. Махненко, создании маталло-керамических соединений член-корреспондент НАНУ О.К. Назаренко.

Многие из выпускников кафедры стали видными деятелями науки и сварочного производства. Среди выпускников кафедры много кандидатов и докторов технических наук. В рамках данной статьи трудно привести имена всех видных выпускников кафедры. Отметим лишь, что многие из них стали академиками НАН Украины и руководителями крупных предприятий и организаций.

В период с 2005 по 2015 г. осуществлен существенный прорыв в повышении научного потенциала кафедры и сварочного факультета в целом. Это стало возможным благодаря осуществлению целевой программы подготовки кандидатов и докторов наук, подписанной Президентом НАН Украины академиком НАНУ Б.Е. Патонем и ректором НТУУ «КПИ» академиком НАНУ М.З. Згуровским и реализованной при их активной поддержке. В рамках этой программы на сварочном факультете подготовлено 5 докторов и более 10 кандидатов технических наук.

В последнее время кафедра плодотворно сотрудничает с известными фирмами: ТОВ «Фрониус Украина» и ТОВ «Бинцель Украина ГМБХ», а также Опытным заводом сварочного оборудования ИЭС им. Е.О. Патона, Опытным заводом сварочных материалов ИЭС им. Е.О. Патона, где работают наши выпускники. Эти фирмы оснащают лаборатории кафедры инновационным оборудованием, обеспечивают информационными стендами и сварочными материалами, проводят лекции-презентации о современных достижениях в области сварочного производства. Студенты с большим интересом посещают эти предприятия.

Сотрудники кафедры принимают активное участие в развитии международного сотрудничества. В частности, проф. В.В. Квасницкий, доц. Л.А. Жданов и А.А. Сливинский, зав. лаб. А.А. Гринюк принимают активное участие в международных проектах Китайско-украинского института сварки им. Е.О. Патона. Активно проводятся совместные исследовательские и образовательные программы с Белорусским государственным университетом, Магдебургским университетом им. Отто-фон-Ге-

рике (Германия), Федеральным университетом в г. Уберландия (Бразилия), организациями других стран.

За 80 лет кафедра сварочного производства подготовила тысячи высококвалифицированных специалистов, сыгравших важную роль в развитии сварочной науки и производства. Наши выпускники с успехом работают не только в Украине, но и во многих странах: Германии, США, Канаде, России, Австралии, Новой Зеландии, Израиле.

Студенты кафедры в ее истории

Много славных страниц в историю кафедры вписали ее студенты. Они активно работали в студенческих строительных отрядах в Тюмени, на Сахалине и других районах Советского Союза, а также в Чехословакии.

В 1985–1987 гг. специализированные студенческие бригады кафедры сварочного производства участвовали в крупномасштабном научно-техническом эксперименте по строительству трубопроводов из полиэтиленовых труб для газификации и водоснабжения населенных пунктов Новоодесского района Николаевской области. Это было хорошим примером плодотворного сотрудничества кафедры с Институтом электросварки им. Е.О. Патона, когда студенты под руководством преподавателей участвовали во внедрении разработок ученых.

Студенты кафедры постоянно участвуют во Всеукраинских студенческих олимпиадах по сварке и занимают первые и призовые места в индивидуальном и командном зачете. Студенты-магистранты и аспиранты выступают с докладами на ежегодных научных конференциях. Наша команда в 2010 г. заняла призовое место во Всеукраинских инженерных соревнованиях и представляла Украину на Европейских соревнованиях. Кафедра сварочного производства всегда славилась своими активистами, которые участвовали в организации Дней факультета — выпуске многотиражной студенческой газеты, организации радиовещания в нашем корпусе, создании студенческой библиотеки из нескольких тысяч книг по сварке. Студенты кафедры вносят свою лепту в победы спортивных команд факультета по футболу, баскетболу, шейпингу, а также добиваются высоких результатов в индивидуальных видах спорта: легкой атлетике, борьбе, боксе, гимнастике, тяжелой атлетике, спортивной стрельбе из лука. Лучшие студенты кафедры по результатам учебы, научной и общественной работы получают стипендии имени Е.О. Патона и Б.Е. Патона, а также стипендии ректора НТУУ «КПИ» и мэра г. Киева.

На кафедре сварочного производства в разное время обучалось много иностранных студентов из Китая, Ирана, Вьетнама, Кубы, Польши, Вен-



Монтаж противокумулятивных экранов сотрудниками кафедры на БТР-80 ВС Украины в зоне АТО

грии, Болгарии и других стран. В свою очередь наши украинские студенты имеют возможность учиться за рубежом. У нас действуют программы двойного диплома с Магдебургским университетом им. Отто-фон-Герике (Германия) и Федеральным университетом в г. Уберландия (Бразилия). Более десяти наших студентов уже получили дипломы магистра украинского и немецкого образца, а также украинского и бразильского образца соответственно. В последнее время коллектив кафедры значительно обновился. В него влились молодые перспективные кадры. За последние 10 лет сотрудниками кафедры было защищено 6 кандидатских диссертаций и в настоящее время большинство преподавателей кафедры являются доцентами. Возглавляет кафедру д-р. техн. наук проф. В.В. Квасницкий.

Участие кафедры в развитии оборонной промышленности Украины

С момента образования кафедры ее сотрудники под руководством академика Е.О. Патона принимали активное участие в работе по оборонной тематике. Выпускники кафедры работали в оборонной промышленности и известен вклад сварщиков в создании танковой и другой техники в годы войны. Такая помощь стала актуальной и в наше время.

Инициативная группа сотрудников и студентов сварочного факультета НТУУ «КПИ» под руководством канд. техн. наук А.А. Сливинского (студ. А. Супрун, Е. Билыцкий, асп. А. Богач, сотр. С.А. Нестуля, доц. Л.А. Жданов и др.) с сентября 2014 г. ведет работы по изготовлению и монтажу

защитных противокумулятивных экранов для бронетехники сил АТО.

Благодаря сотрудничеству с ЦНИИ Вооружений и Военной техники ВСУ в конструкцию экранов и технологию их изготовления был внесен ряд усовершенствований. Экраны успешно прошли баллистические испытания на полигоне Министерства обороны Украины. Оформлена заявка на патент и ведутся работы по принятию экранов данного типа на вооружение. Сегодня единичное производство в механической мастерской сварочного факультета НТУУ «КПИ» силами студентов переросло в серийный выпуск экранов на одном из предприятий Киева. На данный момент факультет осуществляет полное конструкторско-технологическое сопровождение производства экранов, разработан комплект технической документации по экранам для основных образцов легкобронированной техники ВСУ — БТР-80 и БМП-2.

При выполнении боевого задания подразделениями ВС Украины, под огнем противника, благодаря установленным на бронетехнику противокумулятивным экранам были сохранены жизни многих военнослужащих. Сотрудники кафедры получили официальную благодарность от командования ВСУ.

Специалистами сварочного факультета были изготовлены и установлены защитные экраны на бронетехнику мобильных подразделений сил специальных операций Украины. Налажено сотрудничество с оборонными предприятиями Украины по разработке технологических рекомендаций по сварке броневых сталей зарубежного производства и вибрационной обработки сварных бронеконструкций.

В настоящее время ведутся дальнейшие исследования по обработке рабочих элементов экранов с целью повышения эффективности защиты и гарантированного разрушения боевой части противотанковых боеприпасов.

Коллектив кафедры сварочного производства Национального технического университета «Киевский политехнический институт» встречает 80-летие кафедры, полный решимости на высоком уровне вести подготовку специалистов-сварщиков для независимого государства Украина.

С.К. Фомичев, В.П. Бойко, В.В. Квасницкий, Л.А. Жданов, А.А. Сливинский, В.Л. Коваленко

Коллектив Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, в котором трудится уже не одно поколение выпускников Национального технического университета «Киевский политехнический институт», сердечно поздравляет родную кафедру со славным юбилеем и желает ей дальнейших успехов по подготовке высококлассных специалистов для промышленного комплекса Украины.

УДК 621.791:669.14.018

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА СВАРНОГО ШВА, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНООКСИДАМИ

В.Д. КУЗНЕЦОВ, Д.В. СТЕПАНОВ

Нац. техн. ун-т Украины «КПИ». 03056, г. Киев-56, пр-т Победы, 37. E-mail: v.kuznetsov@kpi.ua

Приведены результаты исследований структуры и свойств металла швов при вводе в сварочную ванну порошков нанооксидов. Показано, что доля нанопорошков, вносимых в сварочную ванну, не должна превышать 0,5 % в диапазоне рекомендуемых режимов сварки низколегированных сталей. Установлено, что ввод нанооксидов приводит к преимущественному формированию неметаллических включений как в наноразмерном диапазоне 0,07...0,13 мкм так и в диапазоне 0,3...0,8 мкм при этом, в них наблюдается повышенное по отношению к исходным швам содержание углерода, кислорода титана, алюминия и марганца. Показано, что при вводе нанооксида титана 0,5 % снижается содержание хрупких составляющих структуры и увеличивается до 40 % содержание игольчатого феррита, что с одновременным увеличением пределов текучести и прочности приводит к повышению ударной вязкости в 2 раза. Показано, что при модифицировании металла швов нанооксидами титана и алюминия уменьшается интервал кристаллизации, что может свидетельствовать о их действии как модификаторов 2-го рода. Библиогр. 15, табл. 3, рис. 6.

Ключевые слова: сварной шов, низколегированные стали, нанопорошки, нанооксиды, структура, неметаллические включения, механические свойства, интервал кристаллизации

Анализ исследований и публикаций последних лет указывает на роль неметаллических включений как фактора управления структурой и свойствами литого металла. Показано [1, 2], что инжиниринг включений можно использовать для оптимизации микроструктуры стали, а включения (оксиды, сульфиды, карбиды) размером <1 мкм, способствующие зарождению игольчатого феррита (ИФ), через свои малые размеры выделены в отдельную группу и названы «дисперсоидами», как не оказывающие негативного влияния на снижение механических свойств, но определяющие условия формирования микроструктуры металла.

В работах [3–6] изучено как влияние размера неметаллических включений на гетерогенное зарождение структуры игольчатого феррита, так и состав и особенности распределения неметаллических включений при наличии оксидов алюминия, оксидов и нитридов титана.

Систематические исследования в этом направлении проведены сотрудниками ИЭС им. Е.О. Патона. В работах [7–13] экспериментально изучено и теоретически обосновано влияние карбидов, нитридов и оксидов на условия образования игольчатого феррита и повышение механических свойств металла шва низколегированных сталей.

Особенностью указанных выше работ является исследование роли неметаллических включений, в том числе наноразмерного диапазона, как образовавшихся в металле шва при соответствующих изменениях концентраций вводимых элементов и их реакций с образованием оксидов, нитридов, карбидов, так и при их вводе размером

не больше 1 мкм через шихту порошковой проволоки, а также в виде наноразмерных порошковых инокуляторов.

Развитие работ в этом направлении требует накопления и анализа экспериментальных данных как применительно к номенклатуре низколегированных сталей так и схемам ввода наноразмерных частиц в сварочную ванну.

Цель работы — исследование влияния неметаллических включений на структуру и свойства металла швов при вводе непосредственно порошков нанооксидов в сварочную ванну.

Для выявления общих закономерностей исследования проводились как при сварке низколегированных сталей 09Г2С и 10Г2ФБ проволокой Св-10ХГН2СМФТЮ, так и стали А-514 (18ГСХ-НФ) проволокой Св-09Г2С. Во всех случаях сварку выполняли в смеси газов 72 % Ar + 28 % CO₂ на погонной энергии 12,3 кДж/см.

Наноконпоненты вводились в сварочную ванну в виде лигатуры после прессования и спекания гомогенной смеси порошка железа фракцией 40 мкм и наноразмерных порошков оксидов алюминия или титана (27...41 нм) с заданным объемным соотношением.

Приготовленная лигатура использовалась как расходный электрод заданной длины и диаметра, заложенный в разделку кромок перед сваркой по длине стыка [14]. В этом случае исключалось влияние процессов, связанных с прохождением нанопорошков через дугу.

Исследование структур и неметаллических включений проводили методами оптической и электронной микроскопии с использованием ми-

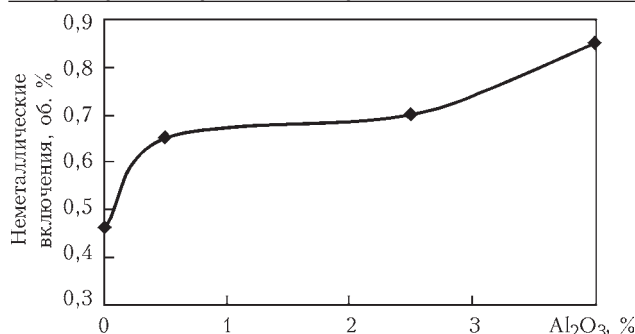


Рис. 1. Зависимость объемной доли неметаллических включений от содержания наноксидов алюминия в сварном шве (сварка стали 09Г2С проволокой Св-0ХГН2СМФТЮ)

кроскопа NEOPHOT-30, электронного сканирующего микроскопа JSM35CF с приставкой для локального рентгеноспектрального анализа INCA Energy 350, а также компьютерных программ, разработанных в ИЭС им. Е.О. Патона для анализа микроструктурных составляющих и распределения неметаллических включений по размерам и составу. Теплофизические характеристики литого металла исследовали на термоанализаторе DSK 404 F1 фирмы «NETZSCH».

Исследования показали, что количество нанопорошка, вводимого в сварочную ванну приводит к изменению количества неметаллических включений в металле шва.

Зависимость общей объемной доли неметаллических включений от содержания наноксидов алюминия в сварном шве приведена на рис. 1.

Если в исходном шве доля неметаллических включений составляет 0,45 % то с введением в сварочную ванну нанопорошка оксида алюминия

в количестве 0,5 % происходит резкое увеличение объемной доли неметаллических включений до 0,65 %. Введение нанопорошка оксида алюминия в диапазоне от 0,5 до 2,5 об. % не оказывает заметного влияния на объемную долю неметаллических включений. Дальнейшее увеличение более 2,5 % нанопорошка вновь приводит к росту объемной доли неметаллических включений с 0,7 до 0,86 %.

Однако результаты оценки структурных изменений для указанного диапазона вводимых наноксидов показали, что превышение объемной доли выше 0,5 % не сопровождается существенными структурными изменениями.

Для примера на рис. 2 приведены структуры металла шва при сварке стали 09Г2С для указанного диапазона изменений объемной доли нанопорошка оксида алюминия.

В исходных условиях в металле шва формируется структура, основными составляющими которой являются выделения полигонального феррита, игольчатого и пластинчатого с упорядоченными и неупорядоченными вторыми фазами. Особенностью структуры является наличие укрупненных образований указанных морфологических форм феррита (рис. 2, а). Микротвердость составляющих изменяется от HV 145 до HV 187.

Микроструктура металла шва с добавлением нанопорошка Al_2O_3 в количестве 0,5% имеет измельченную дисперсную структуру, состоящую в основном из верхнего бейнита, частично нижнего и игольчатого феррита (рис. 2, б). Микротвердость составляющих изменяется от HV 264 до HV 304.

Металл шва с добавлением нанопорошка Al_2O_3 в количестве 2,5 % объемных долей преимущественно имеет микроструктуру внутризеренного феррита и феррита с упорядоченными и неупорядоченными вторыми фазами (рис. 2, в). Микротвердость составляющих практически не меняется и находится в пределах HV 180...189.

Добавление нанопорошка Al_2O_3 в количестве 4, 5 % объемных долей приводит к формированию в структуре внутризеренного феррита с выделениями игольчатого и феррита с упорядоченными вторыми фазами (рис. 2, г). Микротвердость составляющих изменяется соответственно от HV 188 до HV 236.

Отсюда можно сделать вывод, что основную роль в формировании структуры с повышенными прочностными и вязкими свойствами выполняют введенные только в небольшом количестве (0,5 %) наноксиды, а повышение их концен-

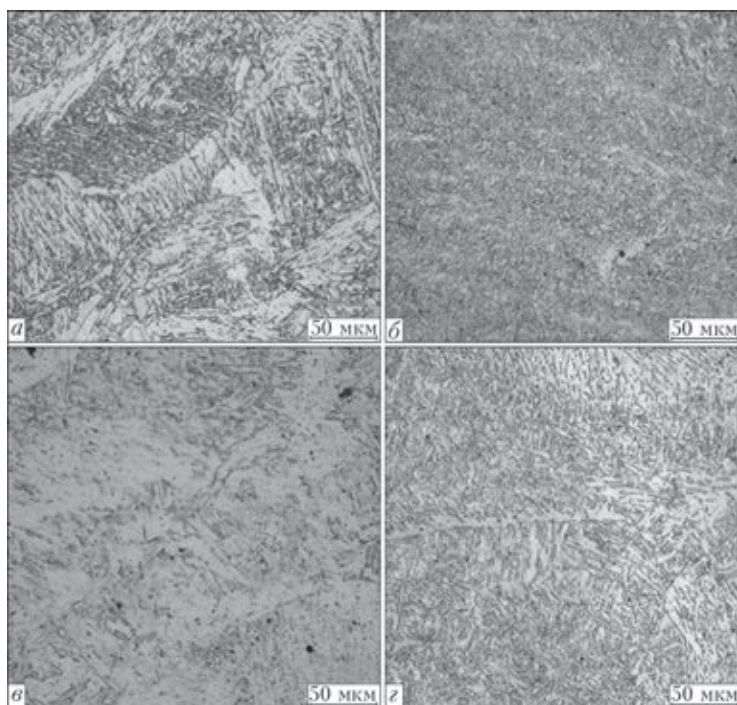


Рис. 2. Микроструктура исходного шва (а) и с добавлением нанопорошка Al_2O_3 в количестве: б — 0,5 %; в — 2,5; г — 4,5

трации, видимо, способствует коагуляции и коалисценции с неметаллическими включениями материала во время кристаллизации сварочной ванны и существенного влияния на структурообразование не оказывает.

Действительно, компьютерная обработка результатов распределения неметаллических включений по размеру позволила выделить из общего массива данных три размерных диапазона: включения размерами до 0,3 мкм, от 0,3 до 0,8 мкм и более 0,8 мкм.

Характерной особенностью неметаллических включений в металле шва является их меньший размерный диапазон при вводе в сварочную ванну наноксидов (рис. 3).

Так, если в исходном шве на размерный диапазон 0,1...0,25 мкм приходится от 5 до 10 включений и на диапазон 0,5...1 мкм от 5 до 40 включений, то в случае ввода наноксида на первый диапазон приходится от 8 до 22 включений и на второй от 5 до 27 включений.

Выявленные закономерности подтверждаются также результатами обработки размеров включений только сферической формы по показателю диаметра равнозначной окружности. Для примера на рис. 4 приведены гистограммы по объемному содержанию и распределению таких включений в металле шва для исходного состояния и с наличием наноксида титана.

В исходном состоянии без добавления нанопорошка оксида основная часть сферических включений от 4 до 6 % приходится как на диапазон размеров до 0,3 мкм, так и на диапазоны 0,3...0,8 мкм и выше. При этом наблюдаются выделения до 9 % частиц размерами до 0,31...0,37 мкм (рис. 4, а).

При добавлении нанопорошка оксида TiO_2 в количестве 0,5 об. % часть сферических включений как размером до 0,3 мкм, так и в диапазоне 0,3...0,55 мкм возрастает от 6 до 14 %. При этом практически не наблюдается наличие включений с размерами больше 0,8 мкм (рис. 4, б).

Результаты локального спектрального анализа химического состава включений показали, что независимо от размера в каждом из них наблюдается существенное повышение концентрации углерода, кислорода, алюминия, серы, титана, марганца. Особенно это заметно для углерода, кислорода, серы (несколько порядков).

Ввод наноксидов, при сохранении общей картины по составу указанных элементов, несколько изменяет ее в сторону

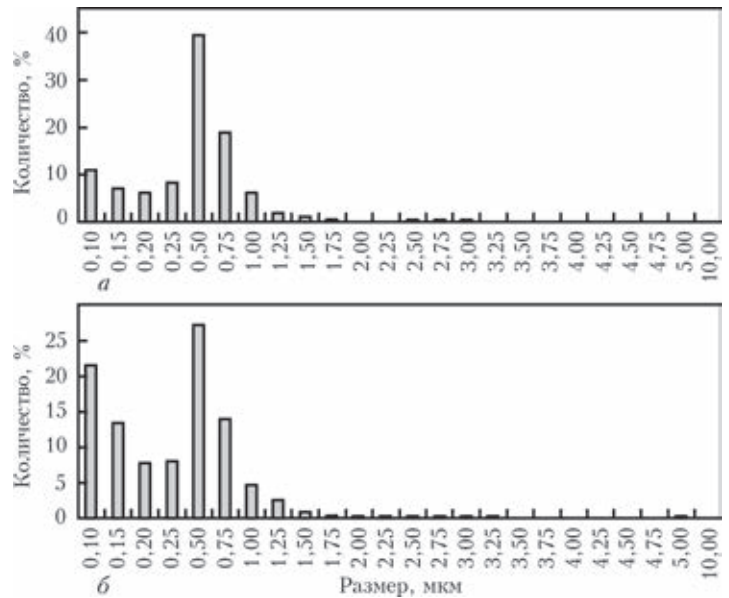


Рис. 3. Гистограмма распределения количества неметаллических включений по размерам: а — в исходном шве; б — в шве с добавлением нанопорошка оксида алюминия в количестве 0,5 %

более высокого содержания кислорода, алюминия и титана, что указывает на наличие во включениях оксидов этих элементов.

Анализ тройных диаграмм оксидов систем $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--MnO}$ и $\text{TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--MnO}$ для наиболее характерного диапазона размера включений 0,3...0,8 мкм также подтверждает повышенное содержание оксидов Al_2O_3 и TiO_2 (рис. 5).

Так, если в исходном шве значительная часть включений как одной, так и другой системы содержит оксид марганца от 50 до 90 %, оксид алюминия до 40 % и оксид титана до 20 % (рис. 5, а, б), то при введении в сварочную ванну TiO_2 в количестве

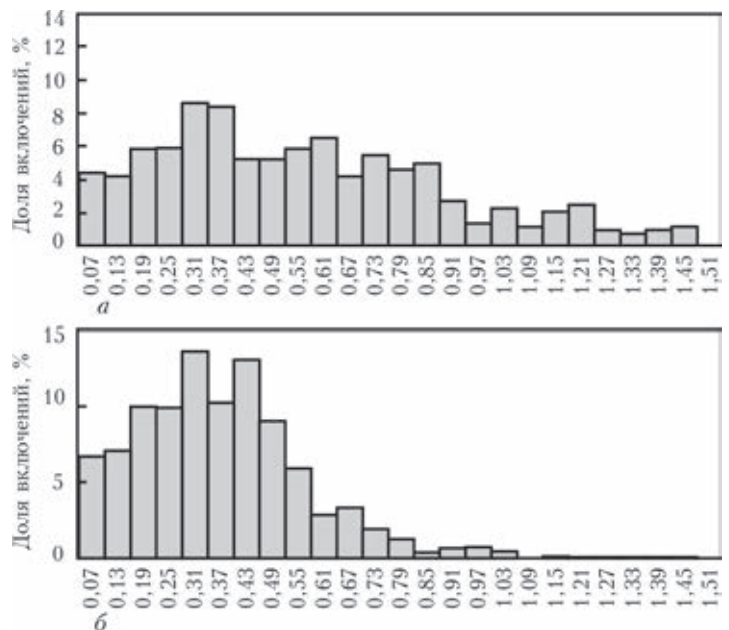


Рис. 4. Гистограмма распределения включений в металле сварного шва за показателем диаметра равнозначной окружности в мкм: а — в исходном состоянии; б — с наноксидом TiO_2 в количестве 0,5 об. %. (сварка стали 10Г2ФБ)

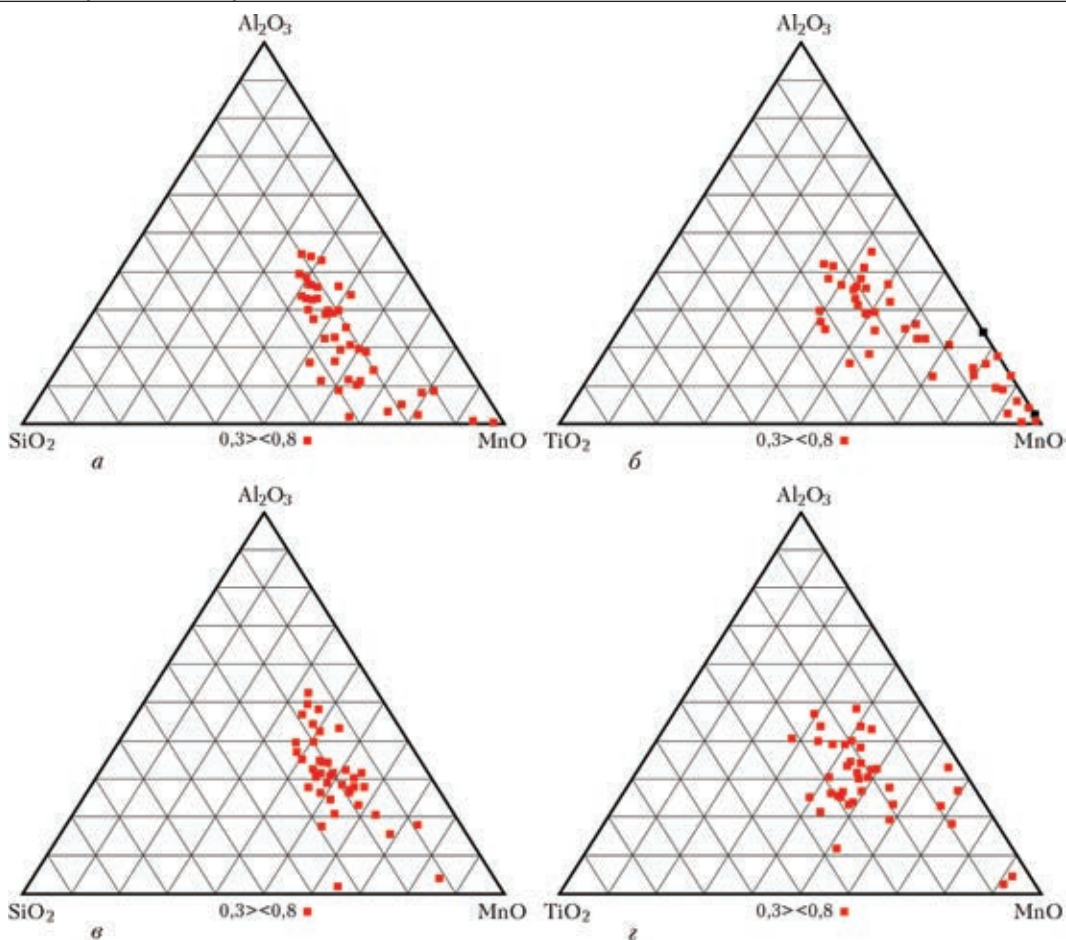


Рис. 5. Тройные диаграммы оксидов систем $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--MnO}$ и $\text{TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--MnO}$: а, б — исходный шов; в, г — 0,5 % TiO_2
0,5% высокое содержание оксида марганца встречается только в единичных включениях, а присутствие во включениях как оксида алюминия, так и титана увеличивается до 55 и 40 % соответственно (рис. 5, в, г).

Таким образом, комплексный анализ включений указывает на существенное отличие их размеров, плотности распределения и состава в металлической матрице при вводе наноксидов, что оказывает влияние на структуру металла швов.

Действительно, по результатам металлографического анализа установлено, что наиболее распространенными морфологическими формами феррита в структуре металла швов являются блочный феррит (БФ), пластинчатый феррит (ПФ), внутризеренный игольчатый феррит (ИФ), феррит Видманштетта (ФВ), верхний (ВБ) и ниж-

ний бейнит (НБ). Процентное содержание каждой из форм в исследованных швах при сварке стали 10Г2ФБ приведено в табл. 1.

Исходная структура сварных швов характеризуется повышенным содержанием хрупких составляющих (блочный феррит, феррит Видманштетта, верхний бейнит) и формированием игольчатого феррита до 10 % с высоким коэффициентом формы (L/B) 4...7 и длиной игл до 20 мкм.

Микроструктура металла шва имеет достаточно высокое содержание внутризеренного полигонального феррита с выделениями по границам зерен аллотриоморфного феррита (рис. 6, а–в). Швы с такой структурой характеризуются низким уровнем вязкости и пластичности металла. Значения микротвердости структурных составляющих изменяются от $HV\ 231$ до $HV\ 253$.

Структура металла шва с наноксидом TiO_2 в количестве 0,5 % характеризуется пониженным содержанием хрупких составляющих (блочный феррит, феррит Видманштетта, верхний бейнит) и повышенным содержанием игольчатого феррита до 40 % с более благоприятным коэффициентом формы (L/B) 3...5 и длиной игл до 5 мкм в сравнении с исходной структурой (рис. 6, г–е).

Таблица 1. Характерные морфологические формы феррита в структуре швов

Исследованный шов	Составляющие микроструктуры металла швов, %					
	БФ	ПФ	ИФ	ВБ	НБ	ФВ
Исходный шов, без наноксидов	до 10	10...20	до 10	20...40	20...40	до 35
Шов с 0,5 % наноксидом TiO_2	до 10	до 10	20...40	10...20	10...15	до 15

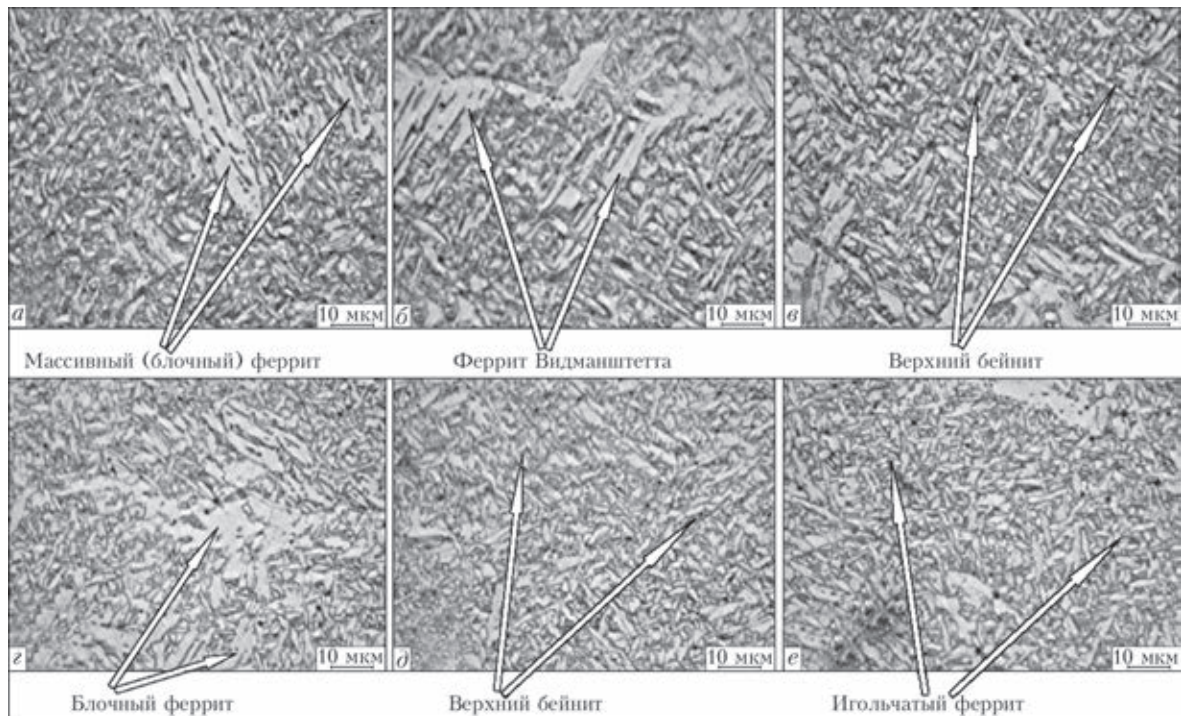


Рис. 6. Характерные структуры металла шва без наноксидов (а–в); с наноксидом TiO_2 в количестве 0,5 об. % (г–е). Стрелками показаны характерные морфологические формы феррита

Швы с такой структурой характеризуются сочетанием достаточно высокого уровня показателей вязкости, пластичности и прочности металла. Измерения показали, что значения микротвердости структурных составляющих изменяются от $HV\ 230$ до $HV\ 250$.

Таким образом, введение в сварочную ванну наноксидов, в частности титана, приводит к позитивным структурным изменениям с точки зрения формирования вязких морфологических форм феррита, что приводит к повышению механических свойств металла швов (табл. 2).

Как следует из данных табл. 2, наблюдается повышение предела текучести на 157 МПа и прочности на 105 МПа при введении в сварочную ванну наноксидов титана, при этом ударная вязкость также увеличивается в 2 раза. Таким образом, независимо от марки исследованных низколегированных сталей и типа введенных наноксидов общим является изменение как размера, плотности распределения и состава включений, так и их положительное влияние на структуру и механические свойства металла швов.

О роли введенных наноксидов в структурообразовании свидетельствуют также данные термограмм дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Исследования выявили отличия как в температурах плавления, так и кристаллизации металла, модифицированного наноксидами (табл. 3).

Общей закономерностью является некоторое снижение температур плавления металла швов при введении наноксидов.

Известно, что наноструктурные материалы отличаются существенно более низкой температурой плавления [15], следовательно, некоторое снижение температур ликвидуса может быть связано с наличием наноксидов в металле швов. Снижение температуры плавления проявляется по-разному для оксидов титана и алюминия. Так, при температуре плавления исходного металла $1543,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ее снижение до $1535,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается при введении 0,5 % TiO_2 и в большей степени до $1522,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ при 1 % Al_2O_3 .

В то же время, за исключением 1 % Al_2O_3 , наблюдается повышение температур кристаллизации металла швов, модифицированных наноксидами. При этом общей закономерностью является, независимо от исследованного диапазона изменений объемной доли введенных наноксидов, уменьшение интервала кристаллизации модифицированного металла.

Так, если для исходного металла он составляет $43,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, то наблюдаемое уменьшение для исследованного диапазона изменений каждого из наноксидов практически одинаково и для оксида алю-

Таблица 2. Результаты механических испытаний при сварке сталей А-514 (18ГСХНФ) проволокой 09Г2С

Исследованный металл шва	Предел текучести, σ_T , МПа	Предел прочности, σ_B , МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость KCV , кДж/м ²
Без нанопорошков	357	542	21	61	4,6
С наноксидом TiO_2 в количестве 0,5 %	514	647	18	54	9,3

Таблица 3. Теплофизические характеристики металла швов

Сплав	$T_{\text{л}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{с}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$
Исходный металл	1543,4	1499,5	43,9
TiO_2 –0,5 %	1535,8	1524	11,8
TiO_2 –1 %	1540,6	1527,7	12,9
Al_2O_3 –0,5 %	1541,9	1518,6	23,3
Al_2O_3 –1 %	1522,5	1499	23,5

миния составляет $\Delta T = 23,3 ^\circ\text{C}$, для оксида титана $\Delta T = 11,8 ^\circ\text{C}$.

Отсюда можно сделать вывод, что действие нанооксидов проявляется уже на стадии кристаллизации, изменяя ее условия в сторону более ускоренного прохождения, возможно как следствие появления на включениях дополнительных центров зародышеобразования, то есть их действия как модификаторов 2-го рода.

На данном этапе исследований не представляется возможным дать однозначную трактовку роли нанооксидов в механизме управления структурообразованием металла швов. Их роль может также проявляться как модификаторов 3-го рода (инокуляторов), которые находясь в расплаве и отбирая тепло на собственный нагрев и, при определенных условиях, расплавление снижают температуру расплава, что приводит к росту скорости кристаллизации. Кроме того, как установлено в работах ИЭС им. Е.О. Патона, их воздействие может также проявляться и на этапе вторичной кристаллизации, влияя на устойчивость аустенита к превращению.

Накопление и анализ экспериментальных данных в этом направлении работ позволит выделить наиболее существенные стороны проявления неметаллических включений, в том числе наноразмерного диапазона, на структурообразование сварного шва.

Выводы

Показано, что увеличение объемной доли введенных в сварочную ванну нанооксидов от 0,5 до 4,5 % приводит к увеличению от 0,46 до 0,87 общей доли неметаллических включений в металле шва, при этом существенные структурные изменения проявляются при вводе объемной доли нанооксида, не превышающей 0,5 %. Характерным в этом случае является увеличение доли включений в малом размерном диапазоне 0,07...0,5 мкм. В металле швов, модифицированных нанооксидами включения содержат повышенное содержание кислорода, алюминия и титана, что указывает на их преимущественный состав из оксидов этих элементов.

Введение нанооксида титана способствует снижению хрупких составляющих феррита и повышению содержания игольчатого, что приводит к повышению механических свойств металла швов, в частности ударной вязкости. Введение нанооксидов уменьшает интервал кристаллизации металла швов, что может свидетельствовать о их действии как модификаторов 2-го рода.

1. Takamura J., Mizoguchi S. Roles of oxides in steels performance – Metallurgy of oxides in steels // Proc. 6th Int. Iron and Steel Cong., ISIJ, Tokyo. – 1990. – Vol. 1. – P. 591–597.
2. Microstructure control of steels through dispersoid metallurgy using novel grain refining alloys / O. Grong, L. Kolbeinsen, C. van der Eijk., G. Tranell // ISIJ Int. – 2006. – № 46. – P. 824–831.
3. Effect of inclusion size on the nucleation of acicular ferrite in welds / T.K. Lee, H.J. Kim, B.Y. Kang, S.K. Hwang // II ISIJ Int. – 2000. – 40. – P. 1260–1268.
4. Yamamoto K., Hasegawa T., Takamura J. Effect of boron on intra-granular ferrite formation in Ti-Oxide bearing steel // ISIJ Int. – 1996. – 36. – P. 80–86.
5. Influence of aluminum content on the characterization of microstructure and inclusions in high-strength steel welds / W. Vanovsek, C. Bernhard, M. Fiedler, G. Posch // Welding in the World. – 2013. – 57, Is. 1. – P. 73–83.
6. Jun Seok Seo, Hee Jin Kim, Changhee Lee. Effect of Ti addition on eeld microstructure and inclusion characteristics of bainitic GMA welds // ISIJ International. – 2013. – 53. – № 5. – P. 880–886.
7. Головки В.В., Григоренко Г.М., Костин В.А. Влияние нановключений на формирование структуры металла швов ферритно-бейнитных сталей (Обзор) // Зб. наук. праць НУК. – 2011. – № 4. – С.
8. Дослідження впливу нанорозмірних карбідів титану на формування мікроструктури та властивостей зварного шва / І.К. Походня, В.В. Головки, С.М. Степанюк, Д.Ю. Ермоленко // ФХММ. – 2012. – № 6. – С. 68–75.
9. Головки В.В., Степанюк С.М., Ермоленко Д.Ю. Дослідження впливу наноутворень в металі на формування мікроструктури зварного шва та його механічні властивості // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. тр. – 2012. – Вып. 64. – С. 155–159.
10. Головки В.В., Походня И.К. Влияние нематаллических включений на формирование структуры металла швов высокопрочных низколегированных сталей // Автомат. сварка. – 2013. – № 6. – С. 3–11.
11. Головки В.В., Степанюк С.Н., Ермоленко Д.Ю. Технология сварки высокопрочных низколегированных сталей с введением титаносодержащих инокуляторов // Наноразмерные системы и материалы в Украине / Ред. А.Г. Наумовец (глав. ред.); НАН Украины. – Киев: Академперіодика, 2014. – С. 395–399.
12. Головки В.В., Степанюк С.Н., Ермоленко Д.Ю. Влияние титаносодержащих инокулянтов на структуру и свойства металла швов высокопрочных низколегированных сталей // Автомат. сварка. – 2015. – № 2. – С. 16–20.
13. Влияние нанопорошковых инокуляторов на структуру и свойства литого металла высокопрочных низколегированных сталей / Г.М. Григоренко, В.А. Костин, В.В. Головки и др. // Современ. электрометаллургия. – 2015. – № 2. – С. 32–41.
14. Пат. № 98985 UA, МПК (2006.01) В 23К 9/16. Спосіб електродугового зварювання з введенням у зварювальну ванну нанокомпонентів / В.Д. Кузнецов, П.І. Лобода, С.К. Фомічов и др. – № у 2014 13486; Заявл. 15.12.14; Опубл. 12.05.15; Бюл. № 9.
15. Рагуля А.В., Скороход В.В. Консолідовані наноструктурні матеріали. – Київ: Наук. думка, 2007. – 349 с.

Поступила в редакцию 21.10.2015

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ОХЛАЖДЕНИЯ ПОСЛЕ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ И ПАЙКИ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ТОРЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ГРАФИТА И МЕДИ

В.В. КВАСНИЦКИЙ¹, Г.В. ЕРМОЛАЕВ², М.В. МАТВИЕНКО³

¹Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт».
03056, г. Киев, пр-т Победы, 37. E-mail: kvas69@ukr.net

²Национальный университет кораблестроения. 54025, г. Николаев, пр-т Героев Сталинграда, 9.
E-mail: welding@nuos.edu.ua

³Херсонский филиал Национального университета кораблестроения.
73022, г. Херсон, пр-т Ушакова, 44. E-mail: matvienkomv@i.ua

Рассмотрено напряженно-деформированное состояние при различных режимах охлаждения цилиндрических узлов из графита и меди в упругой и пластической стадиях с учетом как кратковременных пластических деформаций, так и ползучести. Установлено влияние режима охлаждения на пластические деформации в зоне стыка и осевые напряжения на поверхности узлов, определяющие вероятность разрушения хрупкого графита. Библиогр. 7, табл. 3, рис. 12.

Ключевые слова: диффузионная сварка, пайка, соединение графит–медь, напряженно-деформированное состояние, режимы охлаждения, остаточные напряжения, математическое моделирование

В современной технике графитовые изделия применяются в композиции со многими металлами. Графит, имеющий высокую электро- и теплопроводность, широко применяется при создании токоподводящих или токосъемных устройств различных установок и машин, графитизированных электродов, уплотнительных устройств и пр., где его необходимо соединять с металлами. Для этого используют пайку и диффузионную сварку [1, 2]. Общей проблемой для обоих способов соединения являются остаточные напряжения, обусловленные различными термическими коэффициентами линейного расширения (ТКЛР) соединяемых материалов. Остаточные напряжения в соединяемых пластичных материалах обычно приводят к искажению формы и размеров, а в графите, который является хрупким материалом, могут вызвать образование трещин и разрушение.

Для снижения напряжений в металлографитовых узлах выбирают металлы с близкими к графиту ТКЛР. Во многих узлах применяют титан, который далек от графита по электро- и теплопроводности. Лучшим выбором для указанных устройств является медь, но она имеет ТКЛР значительно больший, чем графит, что часто приводит к образованию трещин в графите после остывания узла.

Ранее выполненные нами исследования [3, 4] были посвящены изучению закономерностей формирования полей напряжений и деформаций в зоне стыка при диффузионной сварке (ДС) и пай-

ке деталей из разнородных материалов, знание которых необходимо для оптимизации конструкции узлов и получения качественного соединения. Некоторые общие закономерности образования остаточных напряжений получены для соединений металла и керамики в узлах типа втулка-втулка, в которых модули упругости соединяемых материалов одинаковы [5]. Но у графита и меди они отличаются на порядок, что может при их соединении существенно повлиять на напряженно-деформированное состояние (НДС) узла. Поэтому исследование формирования НДС в медно-неметаллических узлах является актуальным.

Исследования соединений графита (керамики) с металлами показали, что разрушение начинается с трещин, возникающих у стыка в неметалле [1]. После полного разрушения на поверхности металла остается тонкий слой графита, как показано на рис. 1.



Рис. 1. Поверхность разрушения соединения металла (1) с графитом (2)

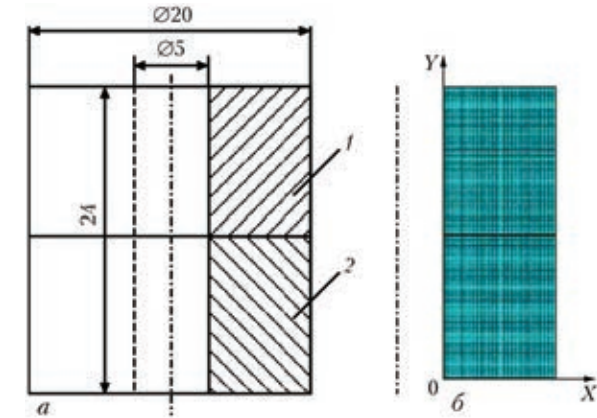


Рис. 2. Общий вид узла В-В (а) и его конечно-элементная модель (б)

Целью работы является исследование методом компьютерного моделирования особенностей формирования НДС при остывании после диффузионной сварки и пайки металлографитовых узлов и влияния на него технологии соединения графита и меди.

Исследования проводились методом компьютерного моделирования с использованием лицензионного программного комплекса ANSYS (10 версии). Решались осесимметричные задачи с конечными элементами (КЭ) типа PLANE 182.

В токоподводящих устройствах обычно используют торцевые соединения, которые и выбраны для исследований. Моделирование выполнялось для узла втулка-втулка (В-В). Эта модель по сравнению с брусом или цилиндром более информативна, поскольку имеет две боковые поверхности и легко трансформируется в цилиндр при внутреннем радиусе, равном нулю, а закономерности формирования НДС в узлах типа цилиндр-цилиндр, как показано в работах [6, 7], сохраняются и в узлах типа брус-брус.

Общий вид узла В-В и сечение его конечно-элементной модели показаны на рис. 2, где цифрой 1 обозначена медная втулка, цифрой 2 — графитовая. Эту модель можно использовать и для соединений, изготовленных пайкой с давлением,

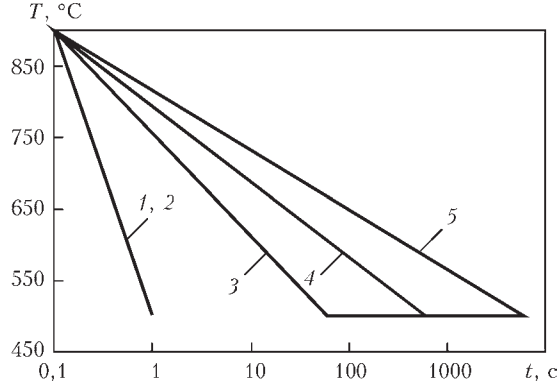


Рис. 3. Термические циклы охлаждения для рассмотренных вариантов

пренебрегая прослойкой припоя вследствие ее малой толщины.

Теплофизические свойства меди и графита, принятые в расчетах, приведены в табл. 1.

Для изучения общих закономерностей формирования НДС рассматривали охлаждение узла в интервале от 900 до 500 °С, в котором ползучесть меди оказывает существенное влияние на релаксацию напряжений.

Моделирование проводили для 5-ти вариантов снижения температуры в указанном интервале:

- упругое решение при снижении температуры до 500 °С (вар. 1);
- упруго-пластическое решение при быстром снижении температуры до 500 °С (вар. 2), когда деформации ползучести пренебрежимо малы;
- упруго-пластическое решение с учетом ползучести при постепенном снижении температуры до 500 °С в течение 60 с и последующей выдержке до 6000 с при 500 °С (вар. 3);
- упруго-пластическое решение с учетом ползучести при постепенном снижении температуры до 500 °С в течение 600 с и последующей выдержке до 6000 с при 500 °С (вар. 4);
- упруго-пластическое решение с учетом ползучести при постепенном снижении температуры до 500 °С в течение 6000 с (вар. 5).

Термические циклы для рассмотренных вариантов приведены на рис. 3.

Таблица 1. Теплофизические свойства соединяемых материалов

Материалы	Температура, °С	Модуль упругости $E \cdot 10^3$, МПа	Коэффициент Пуассона	ТКЛР $\cdot 10^6$, 1/град	Предел текучести, МПа	Модуль упрочнения $\cdot 10^3$, МПа
Графит	20	9,3	0,18	4,8	-	-
	200	9,4		5,0	-	-
	400	9,8		5,1	-	-
	700	10,3		5,5	-	-
	900	10,8		5,7	-	-
Медь	20	125	0,34	16,7	69	1,5
	200	110		17,2	60	1,3
	400	100		17,8	45	0,9
	700	60		19,4	17,3	0,8
	800	40		20,5	11,5	0,7
	900	38		19,8	8,5	0,6

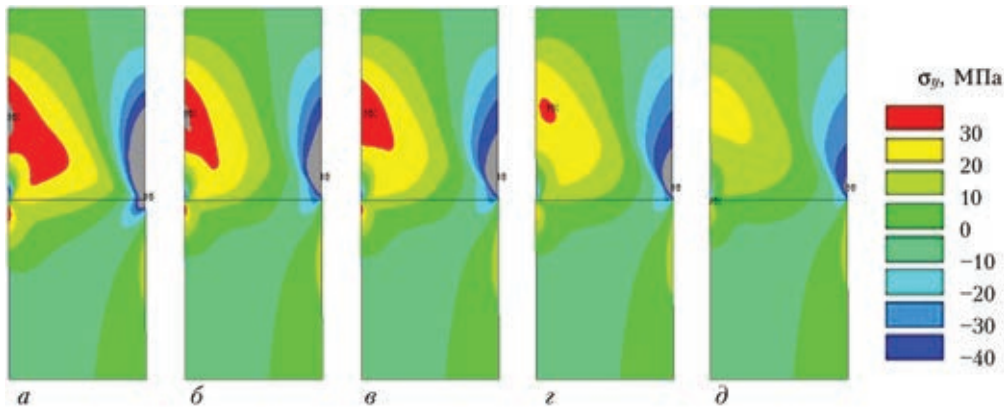


Рис. 4. Осевые напряжения после охлаждения до 500 °С в вариантах 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г) и 5 (д)

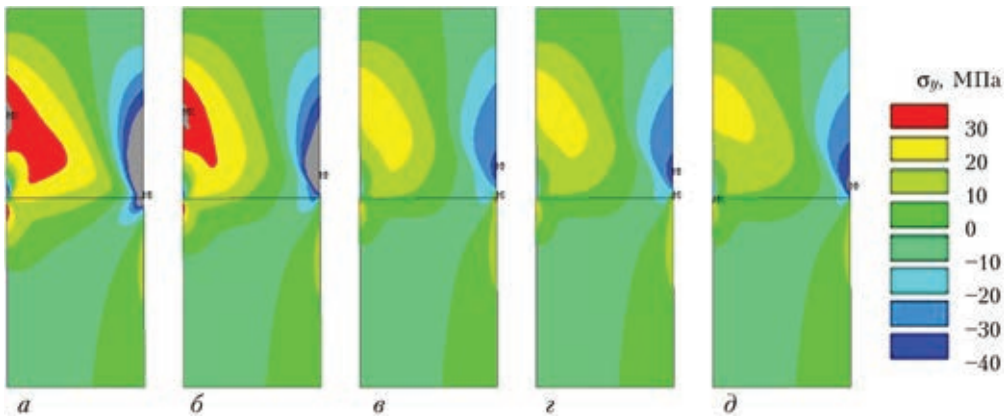


Рис. 5. Осевые напряжения после охлаждения и выдержки в вариантах 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г) и 5 (д)

В вариантах 3–5 скорость ползучести меди определялась по уравнению

$$\dot{\epsilon} = C_1 \sigma^{C_2} e^{-\frac{C_3}{T}},$$

где $C_1 = 1,67 \times 10^{-30}$, $C_2 = 5$, $C_3 = 25872$ — коэффициенты уравнения, полученные нами экспериментально при исследованиях ползучести меди.

Анализировались поля и эпюры распределения напряжений, деформаций и перемещений на различных стадиях охлаждения, включая моменты окончания снижения температуры (все варианты) и окончания выдержки при температуре 500 °С (варианты 3 и 4). Далее приводятся только поля и эпюры осевых напряжений, которые, как показано в работе [5], являются основной причиной хрупкого разрушения материалов с низким ТКЛР.

Как показал анализ полей напряжений при различных вариантах охлаждения, все составляющие

напряжений, включая эквивалентные, заметно изменяются с изменением скорости охлаждения, особенно в меди (рис. 4). Последующая выдержка при температуре 500 °С (вар. 3 и 4) еще больше изменяет их (рис. 5). При этом радиальные, окружные, касательные и эквивалентные напряжения сосредоточены вблизи стыка, а осевые напряжения — у внутренней и внешней поверхностей втулки.

В соответствии с напряжениями распределены и пластические деформации — со стороны меди в непосредственной близости от стыка, в большей степени на расстоянии около четверти толщины втулки от ее наружной поверхности (рис. 6 и 7).

Анализ полей и величин пластических деформаций (табл. 2) показал, что с увеличением времени охлаждения мгновенные деформации в меди уменьшаются от 1,4 % в вар. 1 вплоть до нуля в вар. 5. Деформации ползучести на стадии сни-

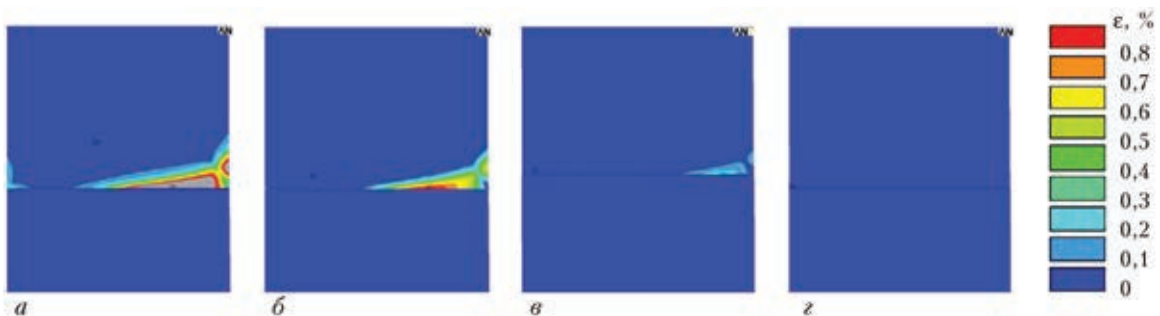


Рис. 6. Эквивалентные деформации мгновенной пластичности после охлаждения до 500 °С в вариантах 2 (а), 3 (б), 4 (в) и 5 (г)

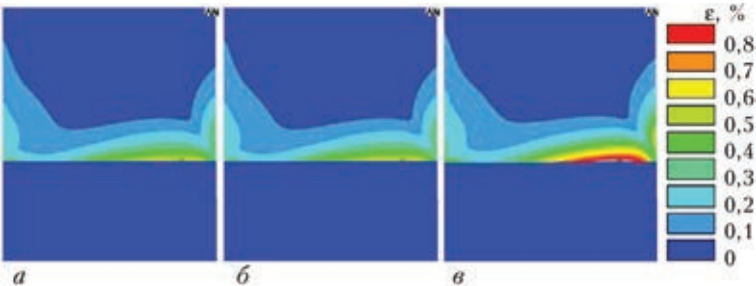


Рис. 7. Эквивалентные деформации ползучести после охлаждения и выдержки в вариантах 3 (а), 4 (б) и 5 (в)

жения температуры, напротив, заметно увеличиваются с увеличением времени охлаждения до температуры 500 °С (от 0,4 % в вар. 3 до 1,05 % в вар. 5). Суммарные пластические деформации на стадии охлаждения уменьшаются от 1,4 % в варианте 2 до 1,05 % в варианте 5.

В процессе выдержки при постоянной температуре 500 °С (вар. 3 и 4) деформации ползучести увеличиваются незначительно (0,19 и 0,22 %). В резуль-

Таблица 2. Максимальные пластические (эквивалентные) деформации в меди, %

Вариант	Окончание охлаждения			Окончание выдержки	
	Мгновенные деформации	Деформации ползучести	Сумма	Деформации ползучести	Сумма
2	1,4	0	1,4	0	1,4
3	0,9	0,4	1,3	0,59	1,49
4	0,23	0,75	0,98	0,97	1,21
5	0	1,05	1,05	1,05	1,05

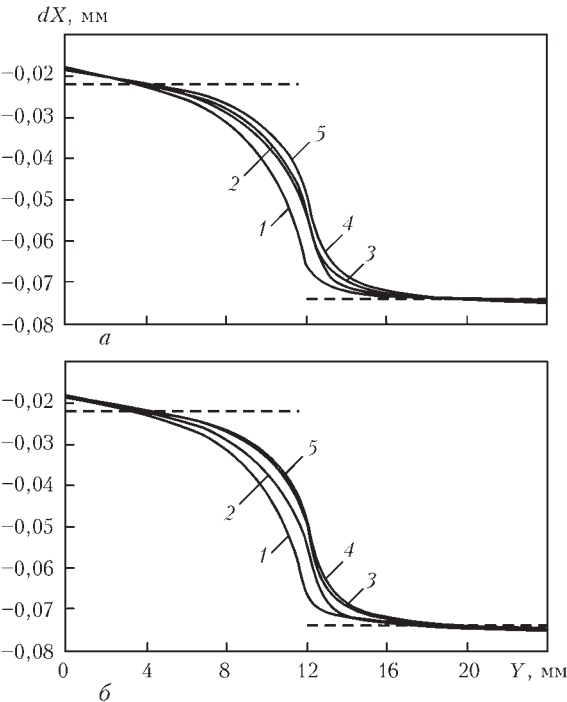


Рис. 8. Эпюры радиальных перемещений точек наружной поверхности втулки после охлаждения до 500 °С (а) и после охлаждения и выдержки (б); варианты 1...5 (соответствуют номерам кривых)

тате суммарные деформации ползучести за весь период охлаждения и выдержки при 500 °С растут с увеличением времени охлаждения и соответствующем уменьшении времени выдержки от 0 (вар. 2) до 1,05 % (вар. 5), тогда как суммарные (мгновенные и пластические) уменьшаются с 1,4 % (вар. 2) до 1,05 % (вар. 5).

Таким образом, с точки зрения развития кратковременных пластических деформаций в меди, более эффективно увеличение скорости охлаждения, чем увеличение времени выдержки после снижения температуры. С точки зрения деформаций ползучести — наоборот, более эффективно медленное охлаждение.

Различается также и характер полей пластических деформаций кратковременных и ползучести (рис. 6 и 7). Кратковременные деформации сосредоточены более концентрировано вблизи стыка на его части, прилегающей к наружной поверхности (рис. 6). Деформации ползучести охватывают всю площадь стыка на расстоянии от него, соизмеримом с толщиной втулки (рис. 7). При этом они в процессе длительной выдержки при 500 °С (вариант 3) заметно уменьшаются (рис. 6, б и 7, а).

Влияние пластических деформаций в меди на осевые напряжения, возникающие на боковой поверхности графита, обусловлено двумя механизмами. С одной стороны, в соответствии с общими принципами механики, пластическое деформирование меди обеспечивает снижение уровня напряжений в ней и, соответственно, в графите, сохраняя условия равновесия узла. С другой стороны они влияют на форму изгиба образующей, которая также влияет на уровень и характер распределения напряжений в меди [5]. Характер этого влияния неоднозначен. Пластические деформации в меди могут как увеличить, так и уменьшить кривизну поверхности, соответственно увеличивая или уменьшая уровень напряжений.

Упругое и пластическое деформирование материала втулки приводит к изменению формы ее поверхностей. Анализ эпюр радиальных перемещений точек наружной поверхности (рис. 8) показал, что характер изгиба образующей в целом сохраняется таким же, как и при одинаковой жесткости соединяемых материалов [5], но заметно нарушаются их кососимметрии относительно плоскости стыка при упругом нагружении (вар. 1). Образующая со стороны более жесткого материала (меди) изгибается меньше, приближаясь к состоянию при свободном сокращении (пунктирная линия). Со стороны менее жесткого материала (графита) картина обратная, изгиб заметно увеличивается.

При возникновении пластических деформаций, мгновенных и ползучести (вар. 2–5), изгиб в более жестком, но пластичном, материале (медь) увеличивается, а в менее жестком упругом материале (графит) уменьшается, форма изгиба образующей приближается к симметричной. То есть, кратковременные пластические деформации, развивающиеся при быстром охлаждении и деформации ползучести (вар. 3–5) компенсируют более высокую жесткость меди в упругом состоянии по сравнению с графитом, уравнивая деформации наружной поверхности в районе стыка.

При этом эпюры радиальных перемещений точек наружной поверхности после охлаждения и выдержки в вариантах 3–5 практически совпадают, несмотря на некоторое различие в величине максимальных пластических деформаций в меди (см. табл. 2).

Характер радиального перемещения точек внутренней боковой поверхности более сложный (рис. 9). Выпуклая часть поверхности графита (материала с меньшим ТКЛР) в непосредственной близости от стыка (1...2 мм) постепенно переходит в вогнутую по мере удаления от него. В меди (материале с большим ТКЛР) картина обратная, вогнутая поверхность вблизи стыка постепенно переходит в выпуклую при удалении от него.

Такая сложная форма изгиба образующей на внутренней поверхности втулки в работе [5] объясняется встречным влиянием двух факторов. С одной стороны это разность взаимного смещения верхней и нижней частей втулки вследствие раз-

ного изменения их диаметров, с другой стороны — разное изменение ширины сечения при температурном сокращении материалов верхней (металлической) и нижней (графитовой) частей узла.

Взаимное смещение верхней и нижней частей втулок приводит к образованию выпуклости на наружной и вогнутости на внутренней поверхности материала с меньшим ТКЛР (графита). Разное изменение ширины приводит к образованию выпуклости на обеих поверхностях этого материала. В результате одновременного действия обоих факторов характер искривления внешней поверхности, т. е. выпуклость наружу, сохраняется, а внутренней заметно изменяется.

Наличие (влияние) двух механизмов перемещений подтверждается также отсутствием симметрии полей пластических деформаций и эпюр касательных напряжений относительно середины толщины втулки. Количественной характеристикой влияния сдвига частей втулки может служить уровень касательных напряжений посередине толщины втулки (около 20 МПа).

При изменении режима охлаждения характер изгиба внутренней поверхности сохраняется, но величина перемещений уменьшается при снижении скорости охлаждения (вар. 3–5). При последующей выдержке различие в перемещениях уменьшается (рис. 9).

В соответствии с деформацией поверхностей распределены осевые напряжения в них (рис. 10, 11). На наружной поверхности они сжимающие в верхней медной втулке (с большим ТКЛР) и

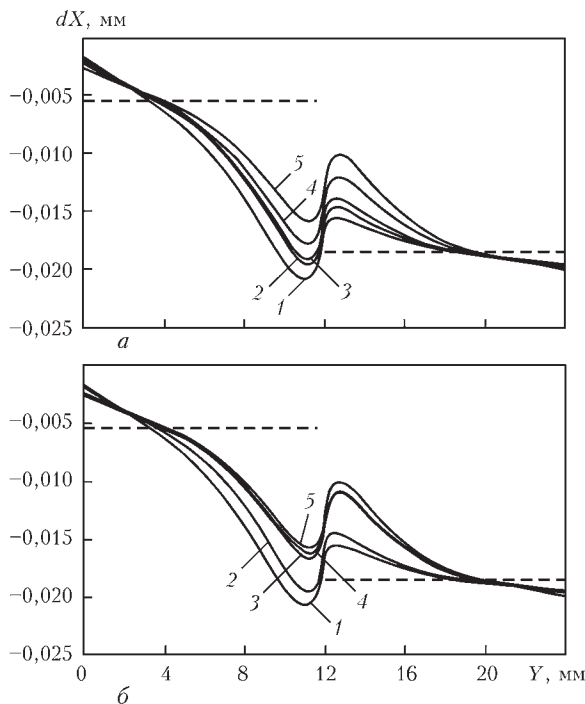


Рис. 9. Эпюры радиальных перемещений точек внутренней поверхности втулки после охлаждения до 500 °С (а) и после полного охлаждения и выдержки (б); варианты 1...5 (соответствуют номерам кривых)

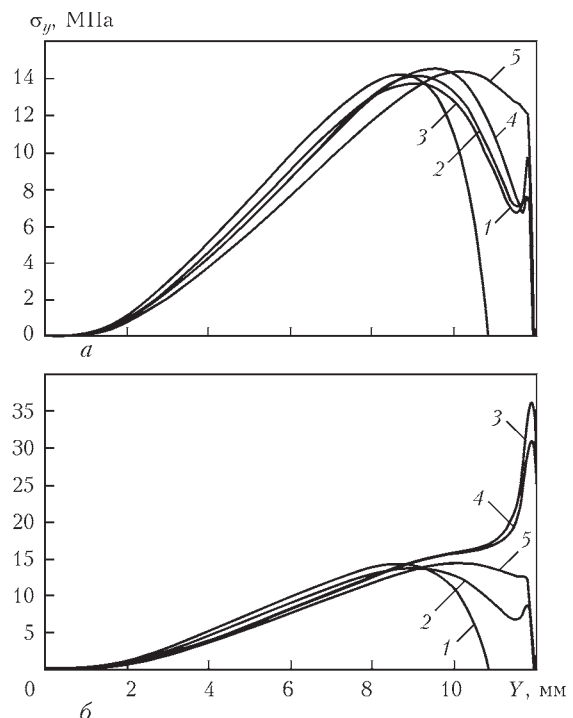


Рис. 10. Эпюры осевых напряжений на наружной поверхности графита после охлаждения (а) и после охлаждения и выдержки при 500 °С (б) моделей 1...5

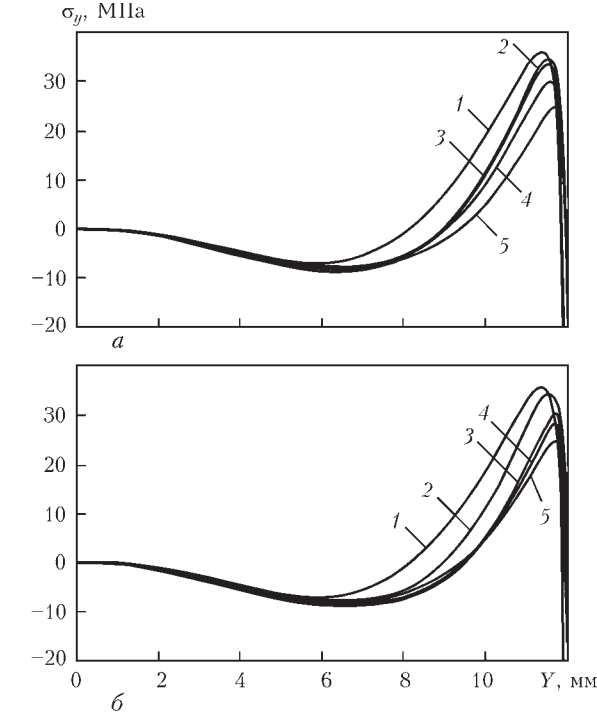


Рис. 11. Эпюры осевых напряжений на внутренней поверхности графита после охлаждения (а) и после охлаждения и выдержки при 500 °С (б) моделей 1...5

растягивающие в нижней графитовой (с меньшим ТКЛР) (рис. 4, 5 и 10).

После охлаждения во всех вариантах максимальной величины (около 14 МПа) растягивающие напряжения достигают вблизи стыка, на расстоянии 2...3 мм, постепенно уменьшаясь до 2-х раз по мере приближения к нему (рис. 10, а). Последующая выдержка при 500 °С в вариантах 3 и 4, когда к кратковременным деформациям добавляются деформации ползучести, приводит к тому, что максимальные напряжения в графите у стыка, напротив, резко возрастают до 30...35 МПа (рис. 10, б), точка максимума вплотную приближается к стыку.

На внутренней поверхности распределение более сложное (рис. 11). В нижней графитовой втулке осевые напряжения вблизи стыка — растягивающие, они постепенно уменьшаются до нуля (на расстоянии 2...3 мм от стыка) и переходят в сжимающие по мере удаления от стыка, затем снова уменьшаются до нуля на торце.

Для удобства сравнения вариантов в табл. 3 и на рис. 12 приведены значения и диаграммы максимальных растягивающих напряжений в графите после охлаждения до 500 °С и выдержки при этой температуре до 6000 с.

Анализ таблицы и рисунков показывает, что с точки зрения образования трещин в графите после охлаждения наиболее опасна внутренняя поверхность, где при всех вариантах, кроме 5, максимальные растягивающие напряжения приближаются к пределу прочности графита на изгиб

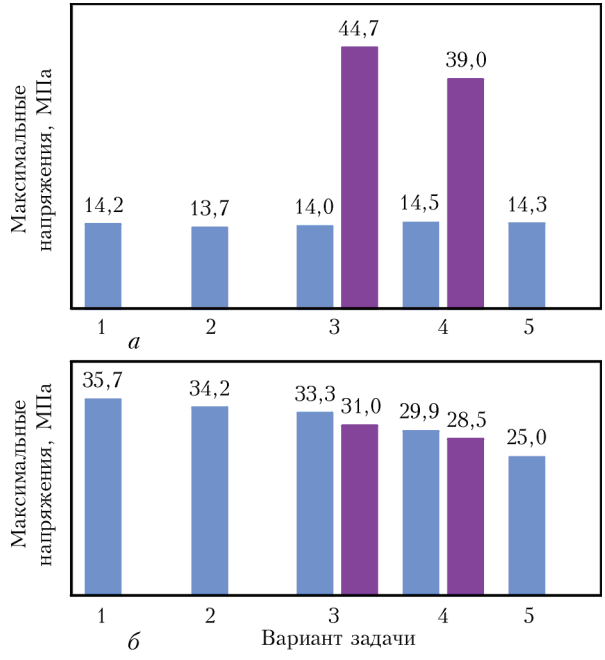


Рис. 12. Максимальные растягивающие напряжения на наружной (а) и внутренней (б) поверхностях графита в вариантах 1...5 после охлаждения до 500 °С и выдержки (вар. 3 и 4) при этой температуре

(45 МПа для графита МПГ-8 и 34,3 МПа для графитов МПГ-6 и МПГ-7). Для наружной поверхности опасными являются варианты 3 и 4, при которых выдержка после охлаждения приводит к большим растягивающим напряжениям.

Таким образом, оптимальным, с точки зрения уменьшения опасности образования трещин в графите после охлаждения до 500 °С, следует считать вариант 5 (постепенное снижение температуры с 900 до 500 °С в течение 6000 с), при котором напряжения растяжения не превышают 25 МПа.

Варианты с быстрым охлаждением и последующей выдержкой не целесообразны, так как при них создаются большие напряжения на внешней поверхности графита.

Дальнейшее охлаждение узла до 20 °С происходит в условиях роста предела текучести и сопротивления ползучести. Скорость ползучести уменьшается и даже при охлаждении от 500 до 20 °С

Таблица 3. Максимальные растягивающие напряжения в графите

Вариант	Максимальные растягивающие напряжения в графите, МПа			
	на наружной поверхности		на внутренней поверхности	
	Окончание охлаждения	Окончание выдержки	Окончание охлаждения	Окончание выдержки
1	14,2	-	35,7	-
2	13,7	-	34,2	-
3	14,0	44,7	33,3	31,0
4	14,5	39,0	29,9	28,5
5	14,3	14,3	25,0	25,0

в течение 3,8 ч остаточные напряжения превышают предел прочности графита (более 65 МПа).

Таким образом, несмотря на эффективное влияние деформаций мгновенной пластичности и ползучести в интервале температур 900...500 °С, применение диффузионной сварки или пайки медными (серебряными) припоями может привести к разрушению узла.

Рассматривая технологические варианты соединения графита с медью, следует отметить достаточно высокие температуры диффузионной сварки. В работе [2] исследовали три варианта диффузионной сварки графита с титаном: с никелевой прослойкой толщиной 10...30 мкм, нанесенной на графит гальваническим путем, с никелевой фольгой толщиной 10 мкм и графита с титаном непосредственно. При сварке с никелевой прокладкой выбрана температура 850 °С, без прокладок 1100 °С. Столь высокие температуры диффузионной сварки не позволяют применять этот способ в данных узлах.

Пайка позволяет регулировать уровень напряжений, изменяя температурный интервал охлаждения путем выбора припоев с необходимой температурой плавления, обеспечивающих работоспособность узлов в конкретных условиях. Расчеты показали, что применение низкотемпературных припоев с температурой плавления до 250 °С гарантирует получение бездефектных соединений. Например, припой ПОС-50 с температурой плавления 209 °С обеспечивает предел прочности на растяжение, равный 36 МПа, т. е. на уровне графита. Учитывая токсичность свинца, целесообразно использовать заменители оловянно-свинцовых припоев, например, разработанный ИЭС им. Е.О. Патона низкотемпературный припой, в котором свинец заменен небольшими добавками серебра. Если для смачивания графита припоем необходима более высокая температура, то целесообразно проводить пайку по двухступенчатой технологии с предварительным лужением поверхности графита. Таким образом, более целесообразно проводить пайку графита с медью с последующим медленным охлаждением. Время охлаждения необходимо рассчитывать для конкретного узла с использованием параметров ползучести меди.

Выводы

1. Все составляющие напряжений и деформаций заметно изменяются с изменением скорости охлаждения.

Последующая выдержка при температуре 500 °С еще больше изменяет их.

2. С точки зрения развития пластических деформаций уменьшение скорости охлаждения более эффективно, чем увеличение времени выдержки после снижения температуры до 500 °С. Это способствует снижению уровня напряжений в узле при остывании.

3. С точки зрения образования трещин в графите после охлаждения наиболее опасна внутренняя поверхность, где при всех вариантах, кроме 5, максимальные растягивающие напряжения приближаются к пределу прочности графита на изгиб.

4. С точки зрения уменьшения опасности образования трещин в графите после охлаждения до 500 °С оптимальным следует считать вариант 5 (постепенное снижение температуры с 900 до 500 °С в течение 6000 с), при котором напряжения растяжения не превышают 25 МПа.

5. Варианты с быстрым охлаждением и последующей выдержкой не целесообразны, так как при них создаются большие напряжения на внешней поверхности графита.

6. Наиболее целесообразно для изготовления медно-графитовых узлов из низкопрочных графитов применять пайку низкотемпературными безсвинцовыми припоями.

1. *Паяння матеріалів: підручник / Г.В. Єрмолаєв, В.В. Квасницький, В.Ф. Квасницький та ін. // Під заг. ред. В.Ф. Хорунова і В.Ф. Квасницького. — Миколаїв: НУК, 2015. — 340 с.*
2. *Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка материалов. — М.: Машиностроение, 1976. — 312 с.*
3. *Квасницький В.В., Єрмолаєв Г.В., Матвиєнко М.В. Влияние пластических деформаций на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке разнородных металлов применительно к узлам цилиндр-цилиндр и втулка-втулка // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2008. — № 1. — С. 100–107.*
4. *Махненко В.И., Квасницький В.В., Єрмолаєв Г.В. Влияние пластических деформаций на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке металлов с разными физико-механическими свойствами // Автомат. сварка. — 2008. — № 8. — С. 5–10.*
5. *Квасницький В.В., Єрмолаєв Г.В., Матвиєнко М.В. Влияние прочности и сопротивления ползучести на остаточное напряженно-деформированное состояние металлокерамических соединений // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2009. — № 3. — С. 83–92.*
6. *Квасницький В.В., Єрмолаєв Г.В., Матвиєнко М.В. Влияние геометрии деталей из разнородных материалов на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке // Там же. — 2008. — № 5. — С. 42–46.*
7. *Роль соотношения размеров цилиндрических деталей из разнородных материалов на их напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке / Квасницький В.Ф., Матвиєнко М.В., Лабарткава А.В. и др. // Автомат. сварка. — 2009. — № 8. — С. 23–27.*

Поступила в редакцию 21.07.2015

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ (Обзор)

А.А. СЛИВИНСКИЙ, Л.А. ЖДАНОВ, В.В. КОРОТЕНКО

НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, г. Киев, пр-т Победы, 37. E-mail: o.slyvinsky@gmail.com)

В работе рассмотрены основные проблемы развития и возможные перспективы дальнейшего совершенствования импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом в инертных газах. Приведены основные технологические возможности и теплофизические характеристики процесса в зависимости от вариаций параметров режимов сварки. Рассмотрены направления в развитии методов математического моделирования процесса сварки и возможные пути их совершенствования. Обоснована необходимость дальнейших исследований процесса для установления параметрических зависимостей и получения в инженерных и научных целях оптимальных режимов сварки импульсной дугой неплавящимся вольфрамовым катодом. Библиогр. 41, рис. 7.

Ключевые слова: импульсная TIG-сварка, термические циклы, жесткость режима, газодинамические характеристики, переходные процессы, дискретизация, разрядность, термопара, метод конечных элементов

TIG-сварка (Tungsten Inert Gas) начала свое активное развитие в эру авиационной и космической техники, а именно в 60-х годах прошлого века. Сегодня дуговая сварка в инертных газах является одним из самых распространенных способов соединения металлов и сплавов, который широко используется в отраслях промышленности с высокими требованиями к сварным швам и конструкциям, особенно в авиации и ракетостроении [1–6].

К концу 1960-х годов было разработано оборудование для сварки на переменном токе с наложением импульсов для соединения алюминия, которое базировалось на механических контакторах и осуществляло импульсно-дуговую сварку неплавящимся электродом. При этом между импульсами поддерживалась постоянная малоамперная дуга, что позволило существенно стабилизировать процесс и повысить качество сварных соединений [7–9]. Развитие TIG-сварки наряду с использованием различных сварочных и вспомогательных материалов (флюсов и паст, присадочных проволок, смесей газов) опирается на способы и методы изменения энергетических характеристик процесса, что позволяет эффективно влиять на тепловложение при сварке [10]. Так, в свое время нашли применение такие способы сварки неплавящимся электродом как шагодуговая сварка [11] и сварка модулированным током [12]. Дальнейшее развитие элементной базы, силовой электроники, а также микропроцессорной и цифровой техники привело к расширению количества управляемых величин и регулируемых параметров режима. В современных источниках питания для импульсно-дуговой сварки их количество состав-

ляет 7...10 параметров. При этом непосредственно на особенности существования дугового разряда влияют следующие параметры: ток в импульсе (I_p), ток паузы (I_b), продолжительность импульса (t_p) и паузы (t_b), время нарастания импульса (t_{up}), время спада импульса (t_{down}), форма импульса. Напряжение на дуге устанавливается длиной дугового промежутка, т. е. задается оператором.

Очевидно, что правильный подбор режимов сварки — сложный и длительный процесс. Поэтому, в настоящее время все более широко применяются так называемые синергетические источники питания, в которых оптимальное соотношение параметров режима в виде программы «прошивается» в сам сварочный источник. Для получения соответствующего программного обеспечения, поддерживающего необходимый режим работы источника, оператор должен задать материал, его толщину, диаметр электрода, положение сварки и характер тока сварки (стационарный или импульсный режим). При этом для облегчения выбора параметров режима сварки предусматривается использование современных компьютерных технологий, с использованием персональных компьютеров (ПК), и технологий связи, а именно Ethernet и WiFi. Создание систем «ПК — сварочный источник питания» уже сегодня позволяет отслеживать все параметры режима сварки, а также проводить их анализ и корректировку в автоматическом режиме непосредственно через программное обеспечение, установленное на ПК (технология «ewm Xnet» [13] от EWM и «Digital Revolution» от Fronius [14]).

С начала появления импульсной сварки неплавящимся электродом по настоящее время было проведено много исследований, создано боль-

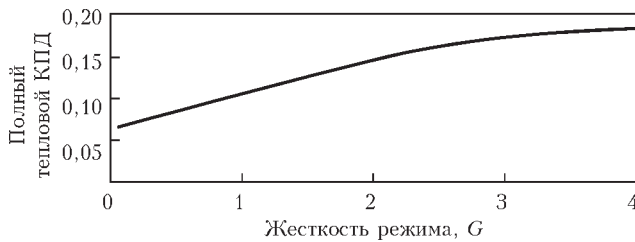


Рис. 1. Влияние жесткости режима на полный тепловой КПД [15]

шое число сварочного оборудования с различными возможностями, и все же большое количество параметров регулирования режима сварки затрудняет его выбор и назначение для конкретно взятой задачи. В особенности это актуально для сварки тонколистового металла, где важно повышать производительность, но не допустить образования прожогов и значительной деформации конструкции. Существующие на сегодня передовые технологии управления процессом импульсной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом, дальше PCGTAW (Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welding), не всегда позволяют добиться оптимального результата, прежде всего, из-за большого набора регулируемых параметров процесса и их взаимосвязей. Поэтому актуальной остается задача исследования их влияния на геометрию сварного соединения, которая зависит от формы сварочной ванны и определяется физическими характеристиками плазмы дугового разряда.

При сварке тонколистового металла важно соблюсти баланс между производительностью и качеством сварного соединения. Импульсное введение тепла позволяет значительно расширить возможности регулирования тепловложения в основной металл и его проплавления. В целом расплавление основного металла и формирование шва можно представить по следующей схеме. В течение импульса тока продолжительностью t_p вводится тепло Q , за счет которого происходит расплавление основного металла с образованием сварочной ванны в виде точки $Q = q_a t_p$, где q_a — эффективная мощность дуги; t_p — продолжительность импульса основного тока. В течение паузы t_b сварочная ванна охлаждается до полной или ча-

стичной кристаллизации. Следующий импульс тепла расплавит такую же точечную сварочную ванну на расстоянии от предыдущей точки $S = v(t_p + t_b)$, где v — скорость сварки. Шов, таким образом, формируется путем периодического расплавления отдельных точек с определенным шагом S . Степень перекрытия точек определяется их размером и шагом. Количество тепла, приходящееся на единицу длины шва, составляет $Q/S = q_a t_p / v(t_p + t_b)$, где выражение $q_a t_p / t_p + t_b$ представляет собой среднюю мощность периодически существующей дуги. Как показано в [15] процесс сварки импульсной дугой в первом приближении можно рассматривать как процесс сварки дугой постоянного тока с мощностью $q_r = q_a / (1 + t_b/t_p)$. Расчетный ток при этом составляет $I_r = I_p / (1 + t_b/t_p)$. Соотношение t_b/t_p характеризует периодичность тока и обуславливает способность к проплавлению периодически существующей дуги — чем оно больше при одном и том же расчетном токе I_r (средней мощности), тем больше импульсный ток (мощность импульса). Безразмерная величина t_b/t_p является технологическим параметром, характеризующим способность к проплавлению периодически существующей (импульсной) дуги при заданной энергии импульса и длительности цикла. Ее называют жесткостью режима сварки импульсной дугой (G).

Таким образом, изменяя жесткость режима и не изменяя величину тока можно влиять на проплавляющую способность импульсной дуги. Сравнительные исследования по сварке стали 12X18H9T толщиной 3 мм постоянной и импульсной дугой, приведенные в [15], показали, что при условии равенства средней погонной энергии и скорости сварки при увеличении жесткости также возрастает и значение полного теплового КПД (рис. 1).

Также акцентируется внимание на то, что с увеличением жесткости режима при условии одинакового проплавления, зона пластических деформаций (нагревающаяся выше 600 °C) уменьшается (рис. 2) [15].

В работе [16] по результатам измерения термических циклов показано, что с возрастанием жесткости режима на одинаковых токах существенно уменьшается зона термического влияния ЗТВ (температура в точках контроля, находящихся на расстоянии 2 мм от оси сварки, уменьшилась на 200 °C с увеличением жесткости режима от 0,3 до 3). Это же подтверждают и результаты, опубликованные в [17] (рис. 3). Таким образом, можно утверждать, что жесткость режима оказывает решающее влияние на форму термических циклов сварки и время существования ванны и может служить обобщенным интегральным параметром PCGTAW-процесса.

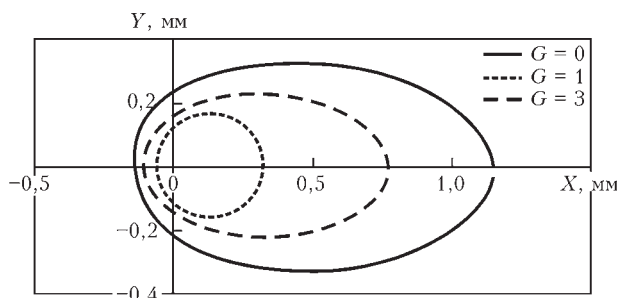


Рис. 2. Расчетные изотермы $T = 600$ °C при различных режимах сварки с использованием импульсной и постоянной дуги; G — жесткость режима [15]

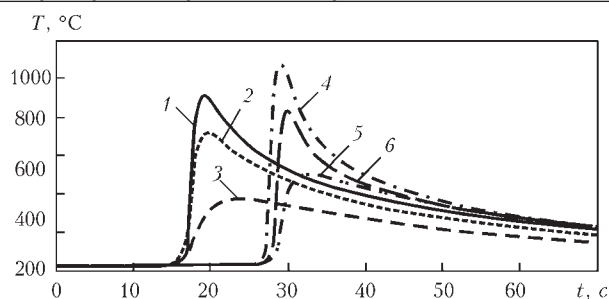


Рис. 3. Термические циклы, измеренные при сварке импульсной дугой (TIGp) (кривые 1–3) и стационарной дугой (TIG) (кривые 4–6) для точек, отстоящих на 4, 6 и 8 мм от оси шва [17]

Рассматривая процесс PCGTAW, кроме временных характеристик импульсов важно выделять такие параметры режимов, как ток в импульсе (I_p), базовое значение тока (I_b) и скорость сварки (v), которая определяет погонную энергию сварки. Если I_p — параметр, прежде всего, влияющий на проплавление основного металла, то I_b , согласно [18], служит для стабилизации дугового разряда, так как при нулевом значении базового значения тока увеличивается вероятность т. н. «блуждания дуги», что влечет за собой неопределенность местоположения участков возбуждения дуги на электроде и снижает стабильность дугового процесса.

Еще одной особенностью PCGTAW является искажение формы дугового разряда с возможным отставанием анодного пятна. Это явление автор [19] объясняет тем, что испарение основного металла, происходящее за время импульса тока, снабжает дуговой разряд атомами с более низким потенциалом ионизации, нежели атомы защитного газа, но одновременно способствует и снижению степени теплового сжатия столба дуги, что, в свою очередь, приводит к высоким значениям падения напряжения за время паузы. В результате этого возникает противоречие между наличием благоприятных условий существования дуги на расплавленном током импульса металле шва и необходимостью ее перемещения в менее благоприятные условия холодного металла. Исходя из принципа термодинамического минимума Штенбека [20], в процессе сварки должны периодически возникать задержки анодного пятна на расплавленном металле, т. к. последний обеспечивает минимальное напряжение дуги. Анодное пятно синхронно перемещается с ванной расплавленного металла, отставая от перемещения электрода до тех пор, пока напряжение растянутой дуги не окажется равным напряжению возбуждения анодных процессов. Вследствие этого перемещение дуги может иметь скачкообразный характер. Такое отставание анодного пятна приводит к существенному колебанию напряжения дуги на 10...15 В [21], что, в свою очередь, приводит к колебаниям тепловой мощности и как результат к нестабиль-

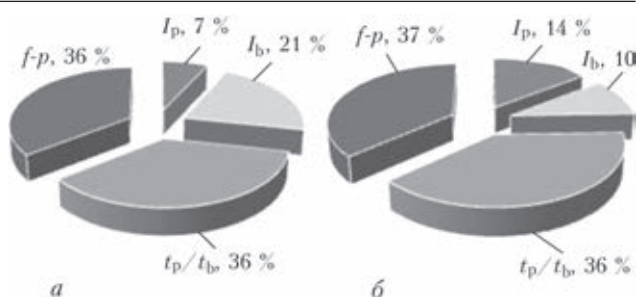


Рис. 4. Диаграммы распределения влияния основных параметров PCGTAW (а) и HF-PCGTAW (б) сварки на проплавление основного металла [26]

ному проплавлению основного металла. Таким образом, можно сказать, что пространственная нестабильность подвижной дуги существенно ограничивает область допустимых параметров режима сварки. Поэтому для поддержания ионизации столба дуги необходимо в периоды времени между импульсами поддерживать некоторый ток дуги до следующего импульса. Таким образом, именно правильным подбором базового значения тока (I_b), поддерживающего ионизацию столба дуги, и частоты импульсов можно добиться стабильности процесса PCGTAW.

Оптимальному подбору параметров посвящено значительное количество современных исследований [22–25]. Количественное подтверждение исследований в подавляющем большинстве представлено математическими зависимостями, полученными с использованием методики Тагучи (Taguchi method). По данной методике в [26] было оценено влияние параметров режима импульсно-дуговой сварки на проплавление основного металла для диапазонов частот пульсации тока до 10 Гц (PCGTAW-процесс) и 100...250 Гц (HF-PCGTAW-процесс). Из диаграмм (рис. 4) видно, что основное влияние на процесс проплавления и формирования сварного соединения как при PCGTAW, так и при HF-PCGTAW оказывает отношение длительности импульса к длительности паузы t_p/t_b (величина обратная жесткости режима) и частота пульсации тока $f-p$. В то же время, наименьшее влияние на проплавление оказывают такие параметры режима, как базовое значения тока и ток в импульсе, хотя физически именно эти параметры влияют на стабильность процесса сварки и, соответственно, качество формирования сварного соединения.

Существует достаточно большое количество работ, посвященных моделированию процесса PCGTAW. При этом основой физико-математического моделирования характеристик дугового импульсного разряда обычно служат экспериментальные данные, полученные с помощью метода зондирования дуги [27–28].

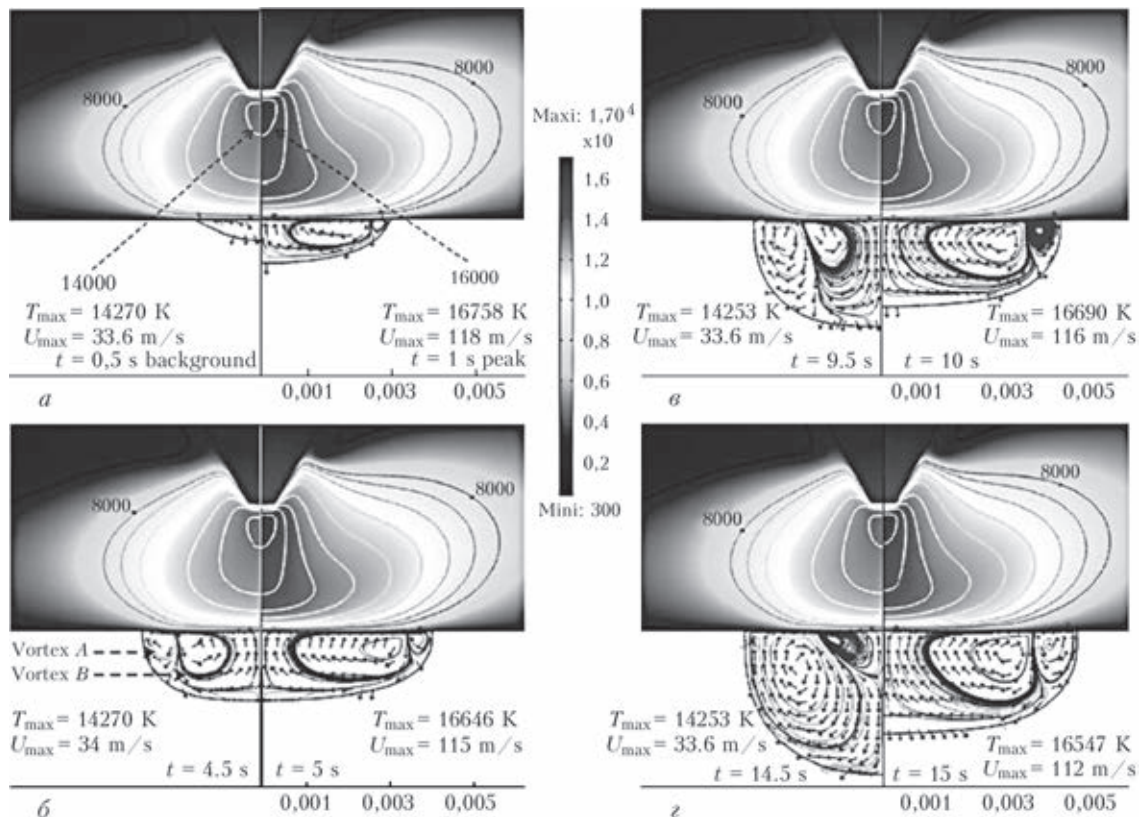


Рис. 5. Результаты моделирования магнитогидродинамических процессов в сварочной ванне для периодов действия базового тока (слева) и тока импульса (справа) в моменты времени: а — 1; б — 5; с — 10; д — 15 с с начала процесса PCGTAW со следующими режимами: $I_p = 160$ А; $I_b = 80$; f-r = 1 Гц; $P_{\text{сac}} = 50\%$ [36]

Результаты математического моделирования дугового разряда между неплавящимся вольфрамовым катодом и медным водоохлаждаемым анодом, приведенные в [29], показали, что при сварке в импульсно-периодическом режиме существование дугового разряда сопровождается существенным изменением электромагнитных, тепловых и газодинамических характеристик дуговой плазмы.

Приведенные результаты моделирования показывают, что важнейшую роль при распределении тепловложения в основной металл играют переходные процессы, экспериментальное исследование которых может быть проведено на основе анализа электронных осциллограмм энергетических параметров дугового разряда — тока и напряжения. При таком осциллографировании чрезвычайно важным является выбор характеристик первичных датчиков и устройства фиксации — аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). Методики выбора первичных датчиков для получения адекватного образа цифрового сигнала подробно описаны в работе [30], принципы выбора АЦП для осциллографирования — в работе [31].

Современные подходы в моделировании физических процессов, протекающих в плазме дугового разряда при PCGTAW, представленные в работах [32–36], предусматривают использование метода конечных элементов (МКЭ). Так, результаты полученные авторами работы [36] бази-

руются на использовании инфракрасной камеры и численного МКЭ-моделирования с использованием комплекса ComsolScript. При этом для вычислений распределения температур в катодной, анодной области и плазмы дуги используется система основных классических уравнений Максвелла. Моделирование магнитогидродинамических процессов показало, что в разные моменты времени сварки в ванной протекают различные процессы, существенно зависящие от электродинамических характеристик столба плазмы, а также от его температуры (рис. 5). Установлено, что максимальная температура вольфрамового катода составляла 3500 К в момент импульса и 3200 К в момент паузы. Максимальная температура в области плазмы составляла 14250 К в момент паузы и 16540 К при действии тока импульса (I_p). Известно, что эти значения существенно зависят от материала анода, величины сварочного тока и расстояния между электродами. В результате расчета также был приведен характер изменения глубины и ширины проплавления в зависимости от количества импульсов, проходящихся на одну и ту же точку металла, что дает возможность говорить о тепловом насыщении в зависимости от количества импульсов (рис. 6).

Основным тезисом, представленных в [36] результатов, является утверждение авторов, что при сварке импульсной дугой, даже при значительной

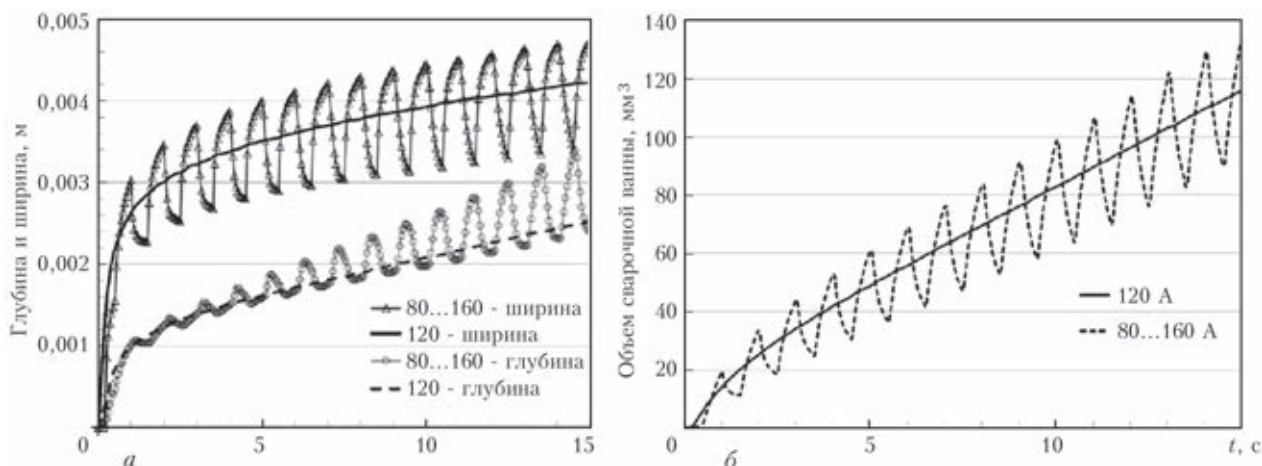


Рис. 6. Сравнение геометрических характеристик сварочной ванны для сварки на постоянном токе и PCGTAW [36]

разнице в базовом и импульсном значении тока, формоизменение сварочной ванны в поперечном сечении не происходит, что допускает регулирование этих параметров в широких пределах при сварке тонколистового металла. Вместе с тем при моделировании в данной работе приняты следующие упрощения: в плазме дуги имеет место термодинамическое равновесие, влияние паров металлов не учитывается. Последнее допущение значительно снижает эффективность использования данной модели для практических целей. В общем случае необходимо отметить, что модель рассчитана для случая точечной сварки, то есть источник тепла неподвижный, что также вносит существенные погрешности при прогнозировании проплавления основного металла.

Как известно, решающее влияние на механические свойства сварного соединения имеют структурные превращения в металле и напряженно-деформированное состояние сварного соединения и конструкции в целом. Эти факторы определяются характером тепловых процессов сварки. И, если моделирование стационарного процесса сварки достаточно широко освещено в научных источниках, то о расчетах тепловых процессов при импульсно-дуговой сварке неплавящимся электродом информации недостаточно. Известно, что теплофизическая обстановка при сварке импульсной дугой существенно отличается от сварки стационарной дугой: процесс распространения тепла становится нестационарным, происходит циклическая смена процессов нагрева и охлаждения в каждой точке шва и околошовной зоны.

Для расчета тепловых процессов TIG-сварки используются схемы точечных, линейных и объемных источников тепла. Основы расчета тепловых процессов при сварке, как известно, были заложены Розенталем и Рыкалыным. Используя расчетные схемы Рыкалина для импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом, в основном, прибегают к ряду упрощений. Примером

могут быть работы [37–38], результаты которых скорее качественные нежели количественные и, кроме того, такой подход не дает возможности предсказать форму сварочной ванны, что делает их неудобными для определения оптимальных режимов импульсной сварки. Для более точного прогнозирования глубины проплавления, а также теплового состояния основного металла необходимо использование объемных источников тепла [39]. Наиболее широко используемая сегодня методика конечно-элементного моделирования тепловых процессов рассматривает объемные источники тепла эллипсоидной формы, в первом приближении напоминающие форму сварочной ванны [40]. В работе [41] приведены результаты моделирования процесса PCGTAW для источника тепла, представленного в виде параболы вращения с нормальным (Гауссовым) распределением мощности. При этом размеры источника определялись экспериментально, по снимкам, полученным с помощью скоростной инфракрасной CCD-камеры. Моделирование проводилось в двух разных постановках: когда источник тепла в пери-

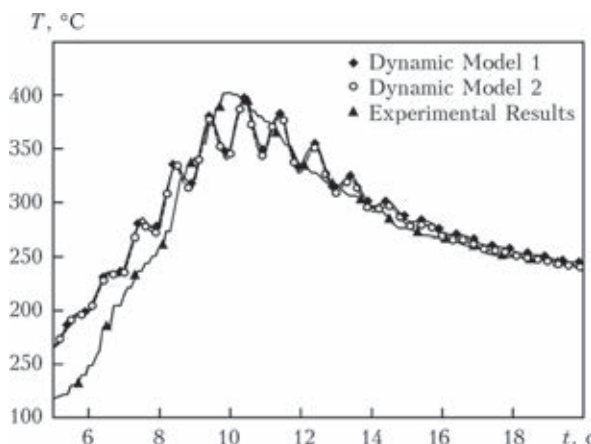


Рис. 7. Термические циклы сварки, полученные экспериментально и в результате МКЭ-моделирования для точки, находящейся на расстоянии 40 мм от начала сварки, 6 мм от оси шва, на глубине 4 мм: $I_p = 160$ А; $I_b = 80$ А; $f = 1$ Hz; $t_p = 0,5$ с; $t_b = 0,5$ с [41]

од действия базового тока задается в виде парабола вращения, а в момент действия основного тока — в виде модели Гаусса (рис. 7, Dynamic Model 1), а также в случае, когда и для момента паузы и для момента импульса источник тепла представляется в виде модели Гаусса (рис. 7, Dynamic Model 2).

Из приведенных термических циклов видно, что обе динамические модели дают удовлетворительную схожесть по максимальным температурам с экспериментальным термическим циклом, чего не скажешь о характере колебаний температур, полученных математически и экспериментально. Очевидно, что при сварке с периодической сменой мощности, характерной для PCGTAW-процесса, также периодически будет изменяться и температура металла, чего не наблюдается на полученной авторами работы [41] экспериментальной кривой. Возможно, подобное несоответствие связано с особенностями измерительного оборудования. Однако кроме схожести температурного расчета с экспериментом важным также является предсказание формы провара, что при использовании предложенной методики реализуется сложно.

Заключение

В результате анализа литературных данных по изучению особенностей импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом в защитных газах (PCGTAW) установлено, что основной проблемой при практическом использовании данного способа является отсутствие возможности прогнозирования влияния параметров режима сварки на физические и технологические свойства дугового разряда и, как следствие, на геометрические характеристики шва.

Показано, что основной технологической характеристикой режима импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом в защитных газах является «жесткость режима».

Установлено, что при анализе процесса PCGTAW, кроме временных характеристик импульсов важно выделять такие параметры режимов как ток (I_p) и напряжение (U_p) в импульсе, а также базовые значения тока (I_b) и напряжения (U_b) и особенно, кратковременные изменения энергетических параметров импульсного дугового разряда.

На основе анализа литературных данных и теоремы Найквиста сформулированы требования к аналогово-цифровому преобразователю (АЦП) для фиксации энергетических параметров PCGTAW-сварки и переходных процессов. Кроме этого, для дальнейшей расшифровки осциллограмм целесообразно использовать синхронизи-

рованную видеофиксацию дугового импульсного разряда.

Результаты моделирования физических процессов в плазме и магнитогидродинамических процессов в сварочной ванне показывают, что в разные моменты времени в ванне протекают различные процессы, существенно зависящие от электродинамических характеристик столба плазмы, а также от его температуры.

Конечно-элементное моделирование тепловых процессов импульсно-дуговой сварки вольфрамовым электродом требует использования расчетной схемы объемного источника нагрева эллипсоидной формы и наличия расчетно-экспериментальных временных зависимостей основных макропараметров для корректного математического описания переменной во времени мощности дуги.

Таким образом, имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные и результаты моделирования процесса PCGTAW достаточно полно отражают существование плазмы дугового разряда в моменты появления импульса тока и его влияние на поведение металла сварочной ванны. Процессы, сопровождающие условия возникновения основного дугового разряда в импульсе и его угасания, т.е. переходные кратковременные процессы, не учитываются из-за отсутствия надежных экспериментальных данных. Это подтверждает актуальность создания оптимальной методики для дальнейшего исследования этих процессов в условиях PCGTAW-сварки, в результате чего станет возможным создание более точной методики прогнозирования влияния режима сварки на геометрические и технологические характеристики сварного соединения.

1. Бродский А.Я. Аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом. — М.: Машгиз, 1956. — 398 с.
2. Петров А.В. Технология дуговой сварки в среде инертных газов: Справочник по сварке / Под ред. Е.В. Соколова. — М.: Машгиз, 1961. — Т 2. — С. 327–375.
3. Актуальные проблемы сварки цветных металлов: Сб. докл. 11 Всесоюз. конф. — Киев: Наук. думка, 1985. — 464 с.
4. Металловедение алюминиевых сплавов / Под ред. С.Т. Кишкина. — М.: Наука, 1985. — 239 с.
5. Руссо В.Л. Сварка алюминиевых сплавов в среде инертных газов. — Л.: Судпромгиз, 1962. — 163 с.
6. Шаханов С.Б. Теория и технология сварочного производства в ракетостроении: Учебное пособие; Балт. гос. техн. ун-т. — СПб., 2007. — 275 с.
7. Гуревич С.М., Замков В.Н., Кушницренко Н.А. Повышение эффективности проплавления титановых сплавов при аргонодуговой сварке// Автомат. сварка. — 1965. — № 9. — С. 1–7.
8. Алов А.А., Шмаков В.М. Аргонодуговая сварка с дополнительным потоком аргона // Свароч. пр-во. — 1962. — № 3. — С. 13–16.
9. Terry C.A., Tyler W.T. Inert-gas tungsten-arc welding // Weld. Eng. Metal Fabr. — 1958. — № 2. — Р. 58–61.
10. Патон Б.Е. Дальнейшее развитие систем автоматического управления и регулирования сварочных процессов // Автомат. сварка. — 1963. — № 5. — С. 1–6.

11. Размышляев А.Д., Патрикеев А.И., Маевский В.Р. Расчетное определение контура ванны при шагодуговой сварке толстолистового металла // Свароч. пр-во. – 1988. – № 5. – С. 35–37.
12. Вагнер Ф.А. Оборудование и способы сварки пульсирующей дугой. – М.: Энергия, 1980. – 118 с.
13. Network-based welding processes analysing, controlling and managing .pdf [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ewm-group.com/ru/service/downloads/brochures-handouts-and-manuals/2698-ewm-xnet-brochure/download.html>.
14. Weld+vision FRONIUS MAGAZINE Fronius 2002 P.11. pdf [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-76553F1D-04EC16FD/fronius_brasil/4000062136_weld_vision_Nr_9_en.pdf.
15. Петров А.В. Славин Г.А. Исследование технологических возможностей импульсной дуги // Свароч. пр-во. – 1966. – № 2. – С. 1–4.
16. Сливинський О.А., Бойко В.П., Препіяло А.О. Математичне моделювання теплових процесів аргондугового зварювання тонколистової нержавіючої сталі феритного класу // Зварювання та споріднені процеси і технології: VI Всеукр. міжгалуз. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та наук. співробітників, 29–31 трав. 2013 р.: матеріали конф. – Київ: НТУУ «КПІ», 2013. – С. 14.
17. Сливинський О.А., Коротенко В.В. Математичне моделювання теплових процесів імпульсного аргондугового зварювання вольфрамовим електродом тонколистової нержавіючої сталі // Зварювання та споріднені процеси і технології: VII Всеукр. міжгалуз. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та наук. співробітників, 14–16 трав. 2014 р.: матеріали конф. – Київ: НТУУ «КПІ», 2014. – С. 19.
18. Ковалев И.М. Некоторые способы стабилизации неустойчивых дуг с неплавящимся электродом // Свароч. пр-во. – 1973. – № 6. – С. 3–5.
19. Ковалев И.М. Пространственная устойчивость движущейся дуги с неплавящимся катодом // Там же. – 1972. – № 8. – С. 1–3.
20. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. – М.: ИЛ, 1961. – 370 с.
21. Козаков Ю.М., Столбов В.И., Корягин К.Б. Отставание анодного пятна движущейся сварочной дуги // Свароч. пр-во. – 1986. – № 10. – С. 19–21.
22. Kim, D. and Rhee, S. Optimization of arc welding process parameters using a genetic algorithm // Welding J. – 2001. – July. – P. 184–189.
23. Giridharan P.K., Murugan N. Optimization of pulsed GTA welding process parameters for the welding of AISI 304L stainless steel sheets // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – January 2009. – 40, Is.5. – P. 478–489.
24. Babu S., Senthil Kumar T. Optimizing pulsed current gas tungsten arc welding parameters of AA6061 aluminium alloy using Hooke and Jeeves algorithm // Transaction of Nonferrous Metals Society of China. – 2008. – Vol. 18. – P. 1028–1036.
25. Chakravarthy M.P., Ramanaiah N., Sundara B.S. K. Siva Rao. Process parameters optimization for pulsed TIG welding of 70/30 Cu–Ni alloy welds using taguchi technique // Intern. Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering. – 2013. – 7, № 4. – P. 342–348.
26. Arivarasu M., Devendranath Ramkumar K, Arivazhagan N. Comparative studies of high and low frequency pulsing on the aspect ratio of weld bead in gas tungsten arc welded AISI 304L plates // Proc. Engineering. – 2014. – № 97. – P. 871–880.
27. Дятлов В.И. Вольт-амперная характеристика сжатой электрической дуги // Автомат. сварка. – № 1. – 1961.
28. Рабкин Д.М., Иванова О.Н. Исследование дуги при сварке вольфрамовым электродом // Там же. – № 5. – 1968. – С. 16–20.
29. Кривіун І.В. Моделирование динамических характеристик импульсной дуги с тугоплавким катодом // Там же. – 2013. – № 7. – С. 24.
30. Можливість використання аналогово-цифрового перетворювача для дослідження зварювальної дуги змінного струму / Л.А. Жданов, А.М. Сливинський, В.Т. Котик та ін. // Машинознавство. – 2003. – № 2. – С. 38–41.
31. Дослідження зварювальної дуги змінного струму за допомогою персонального комп'ютера / Л.А. Жданов, А.М. Сливинський, В.М. Коперсак та ін. // Наук. вісті НТУУ «КПІ». – 2004. – № 3. – С. 49–55.
32. Wu C.S., Gao J.Q. Analysis of the heat flux distribution at the anode of a TIG welding arc // Comput. Mater. Sci. – 2001. – 24. – P. 323–327.
33. Numerical simulation on interaction between TIG welding arc and weld pool / F. Lu, X. Tang, H. Yu, S. Yao. // Ibid. – 2006. – 35. – P. 458–465.
34. Tanaka M., Lowke J.J. Predictions of weld pool profiles using plasma physics // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2007. – 40. – P. 1–23.
35. Traidia A, Roger F, Guyot E. Optimal parameters for pulsed gas tungsten arc welding in partially and fully penetrated weld pools // Int. J. Therm. Sci. – 2010. – 49. – P. 1197–1208.
36. Traidia A., Roger F. Numerical and experimental study of arc and weld pool behaviour for pulsed current GTA welding // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2011. – № 54. – P. 2163–2179.
37. Петров А.В. Применение метода источников для расчета тепловых процессов при импульсно-дуговой сварке // Физика и химия обработки материалов. – 1967. – № 5. – С. 15–25.
38. Вагнер Ф.А. Расчет температур в изделии при импульсной сварке с экспоненциальной формой импульса // Автомат. сварка. – 1975. – № 7. – С. 13–15.
39. Современные аспекты компьютерного моделирования тепловых, деформационных процессов и структурообразования при сварке и сопутствующих технологиях / С.Н. Киселев, А.С. Киселев, А.С. Куркин и др. // Свароч. пр-во. – 1998. – № 10. – С. 16–24.
40. Goldak J., A. Chakravarti, M. Bibby. A new finite element model for welding heat sources // Metallurgical Transactions. – 1984. – V. 15B. – P. 299–305.
41. Zhang Tong, Zheng Zhentai, Zhao Ru. A dynamic welding heat source model in pulsed current gas tungsten arc welding // J. of Materials Processing Technology. – Elsevier B.V. – 2013. – № 213. – P. 2329–2338.

Поступила в редакцию 28.07.2015

УДК 621.791:669.71

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ СВАРКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ*

А.А. ГРИНЮК^{2,3}, В.Н. КОРЖИК^{1,2}, В.Е. ШЕВЧЕНКО^{1,2}, А.А. БАБИЧ²,
С.И. ПЕЛЕШЕНКО⁴, В.Г. ЧАЙКА², А.Ф. ТИЩЕНКО², Г.В. КОВБАСЕНКО²

¹Китайско-украинский ин-т сварки им. Е.О. Патона (Гуандунский Генеральный Институт промышленных технологий)
(Гуанчжоуский научно-исследовательский институт цветных металлов, КНР)

²ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

³НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, г. Киев, ул. Дашавская, 6/2. E-mail: andrey_grinyuk@ukr.net

⁴Южно-Китайский технолог. ун-т, КНР, Гуанчжоу, 510641. E-mail: sviatoslav@qq.com

Выполнен анализ литературы, описывающей характерные технологии сварки алюминиевых сплавов дугой, сжатой скоростным потоком инертного газа. Показано, что плазменно-дуговая сварка является дальнейшим развитием процесса сварки неплавящимся вольфрамовым электродом в инертных газах. Установлено, что в процессе развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов происходил переход от переменного синусоидального тока к постоянному току при обратной полярности, а в дальнейшем и к разнополярному асимметричному току с прямоугольной формой волны тока. Более перспективным направлением совершенствования оборудования для плазменно-дуговой сварки является переход от специализированных источников питания к модульному построению сварочной установки плазменно-дуговой сварки на основе источников питания, применяющихся для сварки неплавящимся электродом, и плазменных модулей. Дальнейший путь усовершенствования процессов плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов — это комбинированное или гибридное использование нескольких источников нагрева, включая сжатую дугу и дугу плавящегося электрода. Наиболее перспективным по мнению авторов является гибридная плазменно-дуговая сварка плавящимся электродом с полным анодом и аксиальной подачей проволоки. Библиогр. 41, рис. 17.

Ключевые слова: плазменно-дуговая сварка, алюминиевые сплавы, переменный синусоидальный ток, разнополярный асимметричный ток, гибридная плазменно-дуговая сварка, плавящийся электрод

Алюминий и алюминиевые сплавы по производству и потреблению занимают второе место после стали. Благодаря комплексу физико-механических, коррозионных и технологических свойств легкие сплавы на основе алюминия успешно применяются не только при создании летательных аппаратов, но и в других отраслях промышленности и в строительстве. Значительны объемы применения алюминиевых сплавов в изделиях военной техники, в судостроении, в производстве автомобильного и железнодорожного транспорта, в электротехнике, при изготовлении криогенной и химической аппаратуры, в сельскохозяйственной и пищевой промышленности. Наряду с многообразием различных способов сварки для получения неразъемных соединений алюминиевых сплавов более широко применяются дуговые способы сварки, которые можно разделить на сварку неплавящимся и плавящимся электродами. При изготовлении конструкций из полуфабрикатов алюминиевых сплавов толщиной 2...12 мм преимущественно используют сварку неплавящимся электродом. В свою очередь сварку неплавящимся

электродом выполняют свободно расширяющейся и сжатой дугой.

Первые упоминания о применении энергии плазменной струи для обработки металлов относятся к 1950-х годам [1]. В настоящее время плазменную струю используют для сварки, резки, нанесения покрытий, поверхностной закалки и др. Для обработки металлов применяют сжатую дугу прямого и косвенного действия. При использовании дуги прямого действия электрический разряд горит между электродом и изделием, а в случае косвенной дуги разряд горит между электродом и плазмообразующим соплом. В этом случае на обрабатываемую деталь воздействует только струя плазмы, выдуваемая через сопло малого диаметра потоком инертного газа.

Сварка плавлением с нагревом сжатой плазменной дугой является дальнейшим развитием способа сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов [2]. В конструкцию горелки дополнительно введено еще одно внутреннее медное водоохлаждаемое сопло. Газ, выдувающийся через отверстие малого диаметра (от 1 до 5 мм)

* Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках программы иностранных экспертов в КНР № WQ20124400119, проекта R&D инновационной группы провинции Гуандун (КНР) № 201101C0104901263 и международного проекта Министерства науки и техники КНР № 2013DFR70160.

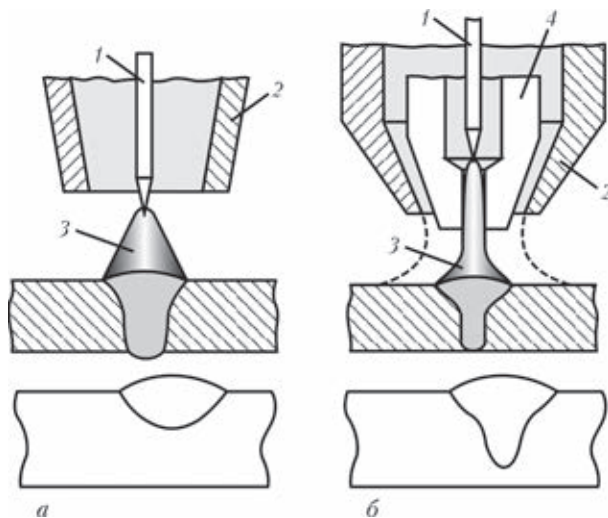


Рис. 1. Схема процесса и форма проплавления сварного шва при дуговой (а) и плазменно-дуговой (б) сварке неплавящимся электродом: 1 — вольфрамовый электрод; 2 — сопло защитного газа; 3 — сварочная дуга; 4 — плазмообразующее сопло

внутреннего сопла, образует вокруг дуги слой тепловой и электрической изоляции, препятствующий ее свободному расширению. Зона сварки защищается потоком инертного газа из внешнего сопла большего диаметра (рис. 1). При этом повышается температура столба дуги и ее напряжение [2].

В целом, анализ опыта применения плазменной дуги для сварки показал, что она является более универсальным источником нагрева металла при сварке по сравнению с электрической дугой при сварке неплавящимся и плавящимся электродом. По сравнению с этими методами плазма обеспечивает более глубокое проплавление металла при одновременном уменьшении объема его расплавления, а также имеет следующие достоинства:

более высокая температура плазменной дуги (до 18000...25000 К);

меньший диаметр дуги;

цилиндрическая форма дуги (в отличие от обычной конической);

давление плазменной дуги на металл в 6...10 раз выше, чем у обычной;

возможность поддерживать дугу на малых токах (0,2...30 А).

Применение плазменной дуги при сварке также обеспечивает отсутствие разбрызгивания металла при сварке, меньший разогрев основного металла и как следствие меньшую его деформацию, отсутствие необходимости во многих случаях подготовки (разделки) за счёт высокой проплавляющей способности плазменной дуги, повышенную экономичность и производительность (в 2...3 раза и более), снижение затрат на механическую обработку при подготовке стыков

под сварку и обработку швов после сварки в 3...5 раз и более, снижение расхода сварочных материалов в 3...5 раз и более, повышение качества сварных швов и обеспечение возможности 100%-й автоматизации процессов сварки продольных и кольцевых швов.

Согласно ГОСТ 2601–84 «Сварка металлов. Термины и определения основных понятий» сварка плавлением, при которой нагрев производится сжатой потоком газа дугой, называется плазменной сваркой. По нашему мнению такое определение больше подходит к процессу сварки сжатой дугой косвенного действия, которую, как правило, не используют для сварки. Поэтому более правильно применять термин «плазменно-дуговая сварка», который оговаривает участие в нагреве детали как энергии дуги, так и энергии плазменной струи.

Плазменно-дуговая сварка переменным синусоидальным током. Особенностью дуговой сварки алюминиевых сплавов является необходимость разрушения поверхностной тугоплавкой оксидной пленки. Для эффективного ее разрушения плазменно-дуговую сварку необходимо выполнять на постоянном токе при обратной полярности или на разнополярном токе [3].

Как и в случае со сваркой неплавящимся электродом свободно-расширяющейся дугой, первые опыты плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов проводили с использованием переменного синусоидального тока частотой 50 Гц. В конце 1960-х годов в ИЭС им. Е.О. Патона интенсивно проводились исследования этого процесса [4, 5]. Для обеспечения горения сжатой дуги к обычной установке для сварки алюминия неплавящимся электродом добавляли блок дежурной дуги, которая горела между электродом и плазмообразующим соплом, ионизируя промежуток между электродом и изделием. При использовании переменного синусоидального тока разрушение оксидной пленки происходит в полупериод обратной полярности, когда на электроде плюс. При этом до 70 % тепла дуги выделяется на электроде. В 1970–1971 гг. способ плазменно-дуговой сварки на переменном синусоидальном токе применялся в судостроении. Так, для его реализации предлагался перспективный автомат для сварки алюминиевых сплавов неплавящимся электродом «Алюминий-1» и источник питания УДГ-701 [6]. В дальнейшем этот способ сварки не получил широкого распространения. В литературе отсутствует информация о серийных установках плазменно-дуговой сварки на переменном синусоидальном токе.

Плазменно-дуговая сварка на постоянном токе при обратной полярности. Впервые плазменно-дуговую сварку на обратной полярности

для соединения листов алюминиевого сплава толщиной 6,35 мм применили сотрудники корпорации «Thermal Dynamics Corp» [7]. Первые работы в Советском Союзе по применению постоянного тока при обратной полярности относятся к началу 1970-х годов [8, 9]. Наилучшее катодное разрушение плены (катодная очистка) при сварке неплавящимся электродом достигается при обратной полярности. В качестве анода выступает электродный узел плазматрона, а катодом служит само изделие. Плазменно-дуговую сварку на постоянном токе при обратной полярности легче реализовать по сравнению со сваркой переменным синусоидальным током. Так, например, можно использовать в качестве источника питания сжатой дуги обычные сварочные выпрямители. Тем не менее этому способу плазменно-дуговой сварки присущ существенный недостаток – при сварке на обратной полярности на электродном узле плазматрона выделяется значительное количество тепла, что приводит к преждевременному разрушению электрода. Для повышения ресурса работы электродного узла осуществляют его интенсивное охлаждение, используют вольфрамовые прутки большого (8...10 мм) диаметра или специальные медные электроды со вставками из тугоплавких материалов (вольфрам, гафний). Для продления срока службы детали плазматрона делают массивными, что увеличивает его габариты. Стабильность горения сжатой дуги постоянного тока при обратной полярности зависит от степени подготовки поверхности деталей под сварку. Наличие неудаленных оксидных плен на поверхности свариваемых изделий может вызвать блуждание пятна нагрева из-за различной эмиссионной способности оксидной пленки и очищенного основного металла [8, 9]. На малых токах это блуждание усиливается. Способ широко применялся для изготовления изделий криогенного назначения из алюминиевых сплавов [10]. В СССР для плазменно-дуговой сварки на постоянном токе обратной полярности выпускались установки УПС-301 и УПС-503, также сварку можно было осуществлять с помощью установки для наплавки УПНС-304. Исследования этой разновидности плазменно-дуговой сварки алюминия интенсивно продолжаются в России. Так, в ОАО «Центр судостроения и судоремонта» разработан полуавтомат ППН-200 для плазменно-дуговой сварки алюминия на постоянном токе при обратной полярности. В качестве источника питания используют аппарат для сварки неплавящимся электродом Master-2500 фирмы «Kemppi» [11]. В группе компаний ОАО «Плазмек» разработан универсальный пост плазменно-дуговой сварки, включающий инверторный источник питания, блок

генерирования дежурной дуги и подачи плазмообразующего газа, блок автономного водяного охлаждения и плазматроны собственной разработки. Список фирм, выпускающих оборудование для плазменно-дуговой сварки постоянным током, обширен — в нем могут быть представлены фирмы из Северной и Южной Америк, Европы и Азии. Так, можно отметить такие модели оборудования: DigiPLUS A7P и DigiPLUS A7PO фирмы «IMC Engenharia de Soldagem» (Бразилия), Ultima150 фирмы «Thermal Arc» (США), PI400 Plasma фирмы «Svejsmaskinefabrikken Migatronik A/S» (Дания), Plasmaweld 402 фирмы «L-TEC Schweißtechnik GmbH» (Германия), PSI 350plus фирмы «Kjellberg Finsterwalde Schweißtechnik und Verschleißschutzsysteme GmbH» (Германия), Tetrix 552 RC Plasma CW фирмы «EWM HIGHTEC WELDING AUTOMATION GmbH» (Германия), PW400 фирмы «ARCRAFT PLASMA EQUIPMENT (INDIA) PVT. LTD» (Индия), Plasma 500XP фирмы «Powwel Co LTD» (Корея) и другие.

С целью повышения эффективности процесса плазменно-дуговой сварки на постоянном токе при обратной полярности российскими учеными была предложена импульсная подача плазмообразующих газов [12–14].

Одним из негативных нюансов применения постоянного тока при обратной полярности для плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов является большая склонность данного процесса сварки к образованию водородной газовой пористости в металле шва [15].

Одной из разновидностей плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов на постоянном токе является процесс сварки Plasmatron, предложенный австрийской фирмой «Inocon Technologie

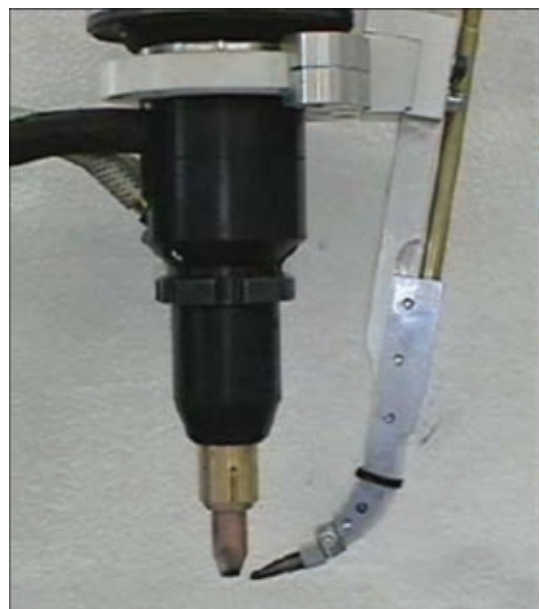


Рис. 2. Внешний вид сварочной горелки Plasmatron (фирма «Inocon Technologie GmbH») [16]

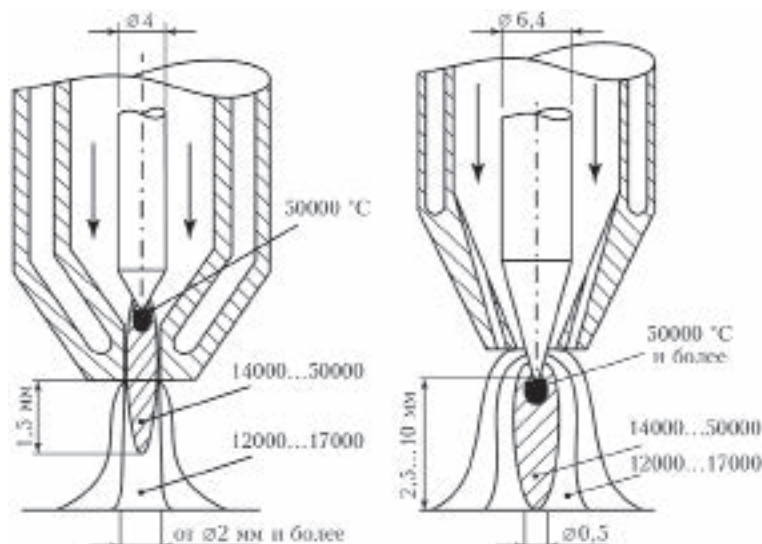


Рис. 3. Распределение температуры в традиционной горелке для плазменно-дуговой сварки (а) и сварочной горелки Plasmatron фирмы «Inoson Technologie GmbH», Австрия (б) [16] (для а — поверхностная плотность теплового потока $10^3 \dots 10^5$ Вт/см²; для б — 10^6)

GmbH» [16]. Особенностью процесса сварки является оригинальная форма сварочной горелки (рис. 2). По словам сотрудников компании «Inoson Technologie GmbH» такая схема процесса сварки позволяет повысить температуру в активном пятне нагрева (рис. 3) и осуществлять сварку без дополнительного блока генерации тока дежурной дуги.

Плазменно-дуговая сварка алюминиевых сплавов с чередованием полярностей на электроде и плазмообразующем сопле. Чтобы уменьшить вредное воздействие тепла, выделяемого на электроде при прохождении тока в полупериод

обратной полярности, и сохранить достаточную катодную очистку шва сотрудниками ИЭС им. Е.О. Патона был предложен оригинальный способ подачи напряжения на плазматрон [17]. В полупериод прямой полярности дуга горела между вольфрамовым электродом и изделием, а в полупериод обратной полярности дуга возбуждалась между изделием и медным плазмообразующим соплом [17]. Благодаря такой схеме подачи энергии на плазматрон достигалось хорошее проплавление, повышалась стойкость вольфрамового электрода, а дуга, горящая в полупериод обратной полярности, обеспечивала эффективное разрушение оксидных плен. Однако это оборудование для плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов не было реализовано в серийном производстве. В наше время к идее раз-

дельной подачи энергии на электрод и плазмообразующее сопло вернулись немецкие ученые. Их установка для плазменно-дуговой сварки с чередованием полярностей на электроде и плазмообразующем сопле также пока остается на стадии лабораторных исследований.

Плазменно-дуговая сварка разнополярным асимметричным током с прямоугольной формой волны тока. Процесс плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током с прямоугольной формой волны тока под названием Variable Polarity Plasma Arc Welding (VPPA) был зарегистрирован фирмой «Hobart Brothers Inc» в

1978 г. [18]. В конструкции сварочных установок, генерирующих синусоидальный сварочный ток, для обеспечения поддержания горения дуги был предусмотрен специальный блок, который формировал дополнительный импульс при переходе от прямой к обратной полярности. Прямоугольная форма волны сварочного тока позволила обеспечить надежное возбуждение дуги при смене полярностей без применения специального блока. С целью снижения тепловой нагрузки на электродный узел горелки плазменно-дуговую сварку разнополярным током с прямоугольной формой волны тока выполняли с преобладанием протекания тока при прямой полярности. При этом длительность прохождения тока при об-

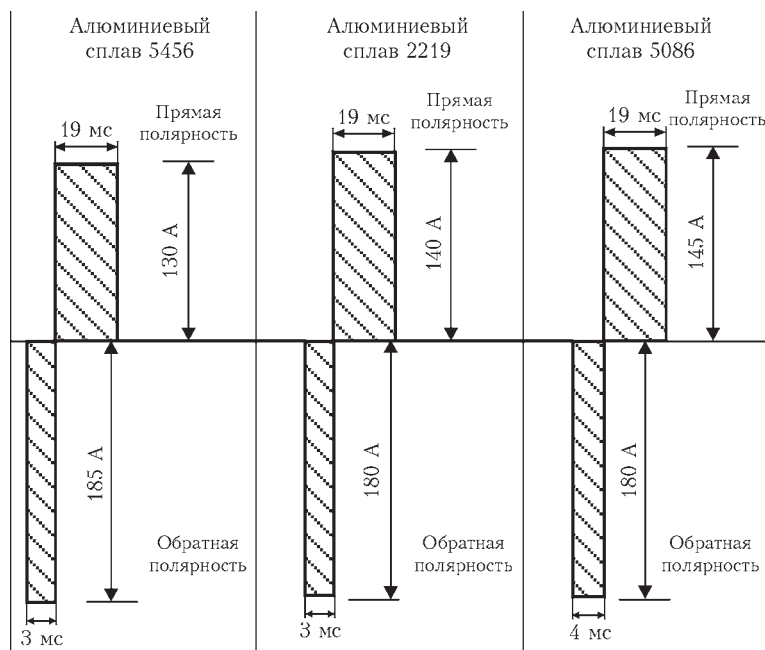


Рис. 4. Амплитуда и длительность протекания тока при прямой и обратной полярности для процесса VPPA при сварке алюминиевых сплавов разного химического состава [18]

ратной полярности выбирают минимально допустимой для обеспечения эффективного катодного разрушения оксидных плен. Соотношение между длительностями прохождения тока при прямой и обратной полярностях составляло примерно 3:1. При этом амплитуда тока при обратной полярности была на 30...40 А выше, чем при прямой полярности (рис. 4) [19]. Снижение количества тепла, выделяемого на электродном узле, позволило повысить работоспособность плазмотрона и уменьшить его геометрические размеры.

В 1972 г. фирма «Sciaky» предложила компании «Boing» использовать для плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов разнополярный асимметричный ток с прямоугольной формой волны тока [20]. Однако источник питания фирмы «Sciaky» не обеспечивал стабильность горения дуги при разнополярном асимметричном токе. В 1974 г. фирма «Hobart Brothers Inc» приступила к разработке источника питания и комплекса оборудования для плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током с прямоугольной формой волны тока для компании «Boing». В 1979 г. первый аналогичный комплекс оборудования для плазменно-дуговой сварки был поставлен в Marshall Space Flight Center. Основой комплекса был источник питания VP-300-S, текущие значения сварочного тока контролировались при помощи Cyber-Tig 11 Series 800 Programmer. Данный комплекс оборудования и его последующие аналоги широко применялись для изготовления топливных баков для жидкого водорода и кислорода космической системы Space Shuttle [21–23]. В 1990-х годах фирма «Hobart Brothers Inc» прекращает выпуск оборудования для процесса плазменно-дуговой сварки разнополярным током VPPA. В то же время потребности американской космической промышленности в области плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов разнополярным асимметричным током удовлетворяются продукцией канадской фирмы «Liburdi» (источник питания LTP400-VP) (рис. 5) и американской компании AMET (источник питания VPC450). Большая стоимость оборудования и сложность в эксплуатации не способствовали широкому распространению этого способа сварки в промышленности.

Наиболее эффективно способ плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током VPPA применялся для формирования сварных соединений на весу без применения подкладных элементов с формирующими канавками. Такой процесс получил название «keyhole» (замочная скважина) (рис. 6). При этом процессе плазменная струя насквозь проникает через расплавленный металл сварочной ванны, образуя сквозной канал, который существует в течение всей сварки. Сквоз-



Рис. 5. Внешний вид источника питания LTP 400–VP (фирма «Liburdi») для плазменно-дуговой сварки по процессу VPPA [18]

ное проникновение плазменной струи полностью устраняет включения оксидной пленки в шве, а также уменьшает деформацию изделия из-за выравнивания нагрева свариваемых деталей по высоте. В качестве плазмообразующего газа использовался 100%-й аргон, а в качестве защитного газа – 100%-й гелий.

Более активное использование в промышленности плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов разнополярным асимметричным током началось с 2000-х годов. Так, в Европе ряд фирм, таких как «Merkle» (Германия), «EWM» (Герма-

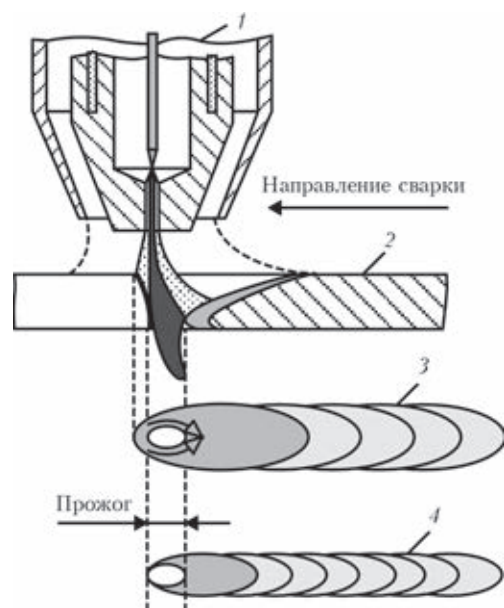


Рис. 6. Принципиальная схема процесса плазменно-дуговой сварки в режиме «замочная скважина» (схема ISF Aachen) [22]: 1 — плазменная горелка; 2 — шов; 3 — поверхность шва; 4 — корень шва)

ния), «Castolin» (Швейцария), «SBI» (Австрия), «Migatron Automation» (Дания) приступили к серийному выпуску оборудования для плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током с прямоугольной формой волны тока. Некоторые из этих установок — Tetrax 350 AC/DC Plasma (EWM) и PMI-380 AC/DC (SBI) можно использовать как для автоматической, так и для ручной плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов.

В начале 1990-х годов в Институте электро-сварки им. Е.О. Патона проводились исследования плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов разнополярным асимметричным током с прямоугольной формой волны тока на тиристорных источниках питания с индуктивными накопителями. Результаты исследований показали, что для качественного формирования шва достаточно только временной асимметрии, т. е. преобладания длительности протекания тока при прямой полярности и равенства амплитуд токов при прямой и обратной полярностях [24, 25].

В 2001 г. по техническому заданию ИЭС им. Е.О. Патона фирма «Fronius» (Австрия) разработала комплекс оборудования для плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов разнополярным

асимметричным током с прямоугольной формой волны. В состав комплекса входят источник питания MW450, плазменный модуль FPM, механизм подачи присадочной проволоки KD 4000, система перемещения плазмотрона, система управления процессом сварки FPA 2003-Plasma, блок автономного водяного охлаждения (рис. 7). При помощи этого комплекса оборудования в ИЭС им. Е.О. Патона была разработана технология плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током алюминий-литиевых сплавов [26, 27].

В отличие от оборудования для плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов других фирм установка для плазменно-дуговой сварки фирмы «Fronius» выполнена по схеме «источник питания + плазменный модуль». Такое конструктивное решение позволяет выбирать для решения поставленных задач источник питания с необходимой мощностью. Если в процессе работы используется сварочный ток не более 150 А, то имеется возможность использовать в составе установки для плазменно-дуговой сварки источники питания с номинальной мощностью до 220 А. В качестве источников питания для плазменно-дуговой сварки могут использоваться все серийные источники питания фирмы «Fronius» для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом разнополярным асимметричным током (источники питания серии MW).

Применение системы управления процессом сварки FPA 2003-Plasma позволяет значительно расширить возможности плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов разнополярным асимметричным током. Так, возможность импульсной подачи плазмообразующего газа позволяет эффективно бороться с пористостью при сварке алюминиевых сплавов, а модуляция сварочного тока и подача присадочной проволоки с переменной скоростью обеспечивает качественное формирование швов при орбитальной сварке неповоротных стыков. Исследования, проведенные в ИЭС им. Е.О. Патона, подтвердили, что более точная регулировка параметров плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током при помощи системы управления процессом сварки FPA 2003-Plasma позволяет использовать этот способ сварки для получения неразъемных соединений из тонких (1,0...2,0 мм) алюминиевых полуфабрика-



Рис. 7. Оборудование фирмы «Fronius» для плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов разнополярным асимметричным током

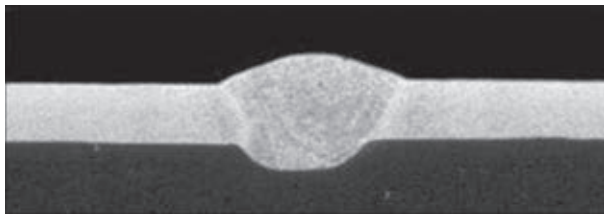


Рис. 8. Макрошлиф сварного соединения из сплава Д16 толщиной 2 мм, сваренного плазменно-дуговой сваркой в нижнем положении

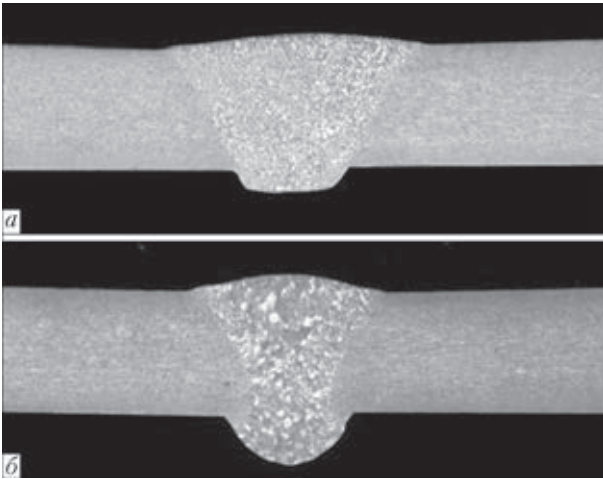


Рис. 9. Макрошлиф сварного соединения из сплава 1420 (Al-Li-Mg) толщиной 6 мм, сваренного плазменно-дуговой сваркой в нижнем положении на подкладке с формирующей канавкой (а) и в режиме сквозного проплавления плазменной струи «keyhole» (б)

тов (рис. 8), а также для выполнения сварки в режиме сквозного проникновения плазменной струи (рис. 9) [27].

Наличие в ассортименте оборудования машинных и ручных плазмотронов, а также переключение работы плазменного модуля позволяют одинаково хорошо использовать оборудование фирмы «Fronius» как для автоматической, так и для ручной плазменной сварки.

В настоящее время плазменный модуль FPM уже снят с производства, новый плазменный модуль PlasmaModule 10 с цифровым управлением, к сожалению, не обеспечивает плазменно-дуговую сварку разнополярным асимметричным током.

В последние годы существует ряд подходов к созданию оборудования для плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током алюминиевых сплавов, а именно – создание специализированных установок для плазменно-дуговой сварки и создание плазменных модулей (консоль) для подключения к серийным источникам питания для сварки неплавящимся вольфрамовым электродом. По нашему мнению, применение дополнительных плазменных модулей для создания установки для плазменно-дуговой сварки на базе источников питания для сварки неплавящимся электродом позволит снизить затраты на создание сварочного поста по сварке сжатой дугой, повысить универсальность применения комплекса оборудования, варьировать значения необходимой мощности источников питания для сварки, более полно реализовать технологические возможности современных источников питания для сварки неплавящимся вольфрамовым электродом.

Лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов. Лазерный луч, будучи электрически ней-

тральным, хорошо может сочетаться со сварочной дугой плавящегося и неплавящегося электродов при горении в общую ванну. Лазерный луч одинаково хорошо сочетается в гибридных сварочных процессах со сжатой дугой неплавящегося электрода, горячей как на постоянном токе при обратной полярности, так и на разнополярном асимметричном токе. Гибридная лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов позволяет сократить ширину шва, увеличить глубину проплавления и скорость сварки по сравнению с обычной плазменно-дуговой сваркой [28, 29].

Плазменно-дуговая сварка с использованием порошка в качестве присадочного материала. При плазменно-дуговой сварке алюминиевых сплавов как постоянным, так и разнополярным током традиционно использовали в качестве присадочного материала проволоку из алюминиевых сплавов. Учеными немецких университетов городов Хемниц и Ильменау было предложено использовать при плазменно-дуговой сварке алюминиевых сплавов в качестве присадочного материала алюминиевый порошок [30]. Применение алюминиевого порошка при плазменно-дуговой сварке имеет ряд преимуществ, а именно — исключаются помехи от направляющих присадочной проволоки при перемещении «рук» роботов, появляется возможность в широком диапазоне выбирать химический состав присадочного материала, возможность быстрой смены направления сварки без разворота плазмотрона с закрепленной системой подачи проволоки. Основным недостатком использования алюминиевого порошка в качестве присадочного материала является большая поверхность, покрытая оксидной пленой по сравнению с присадочной проволокой. Наличие разветвленной поверхности, покрытой оксидной пленой, ограничивало применение данного способа сварки для соединения деталей толщиной менее 2 мм. При малых значениях сварочного тока оксидная пленка эффективно не разрушается в дуге. В данный момент ведутся исследования по возможности повышения мощности дуги за счет применения гелийсодержащих смесей [31].

Двухсторонняя плазменно-дуговая сварка и сварка неплавящимся электродом. Американскими учеными было предложено совместное использование для сварки алюминиевых сплавов плазмотрона и горелки неплавящегося электрода (рис. 10). По такой схеме подключения вместо кабеля массы к изделию подводят горелку неплавящегося электрода [32]. На изделие одновременно с разных сторон воздействует сжатая дуга неплавящегося электрода и свободно расширяющаяся дуга неплавящегося электрода, питающихся от

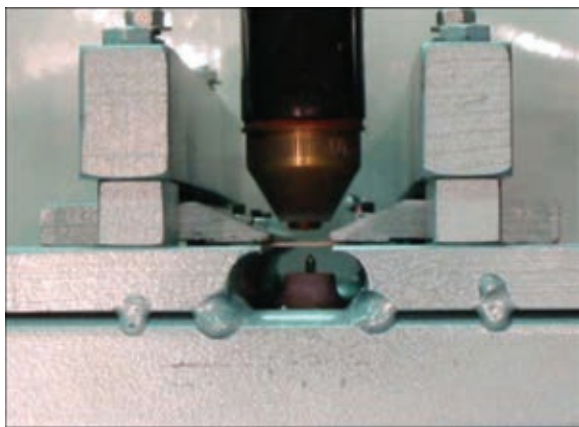


Рис. 10. Двухсторонняя плазменно-дуговая сварка и сварка неплавящимся электродом [32]

одного источника питания. Такое совместное горение дуг увеличивает напряжение обоих дуг, увеличивает глубину проплавления, а также повышает стабильность существования сквозного канала при сварке в режиме сквозного проплавления плазменной дуги [33].

Комбинированное использование плазменно-дуговой сварки и сварки плавящимся электродом. Современное развитие производства алюминиевых конструкций, в частности, для протяженных конструкций транспортов наземного и морского базирования, выдвигают требования повышения скорости сварки. Одним из способов решения такой задачи может быть комбинированное использование нескольких способов сварки, например, плазменно-дуговой сварки и сварки плавящимся электродом. Так, в 2002–2005 гг. в ИЭС им. Е.О. Патона была разработана технология комбинированного использования плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током без присадочного материала и аргонодуговой сварки плавящимся электродом (рис. 11). Между двумя источниками нагрева расстояние составляло 65 мм, общая сварочная ванна отсутствовала. Сжатая плазменная дуга неплавящегося электрода выполняла нагрев изделия и частичное удаление водорода из расплавляемого металла. Формирование выпуклости сварного шва осуществляется за счет плавления электродной проволоки. Комбинированное применение плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током и аргонодуговой сварки плавящимся электродом при достижении одинаковой глубины проплавления с обычной аргонодуговой сваркой плавящимся электродом позволяет уменьшить ширину шва и зону разупрочнения основного металла при сварке, а также величину этого разупрочнения (рис. 12).

Гибридная плазменно-дуговая сварка плавящимся электродом. Одним из перспективных направлений развития процессов плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов является ис-

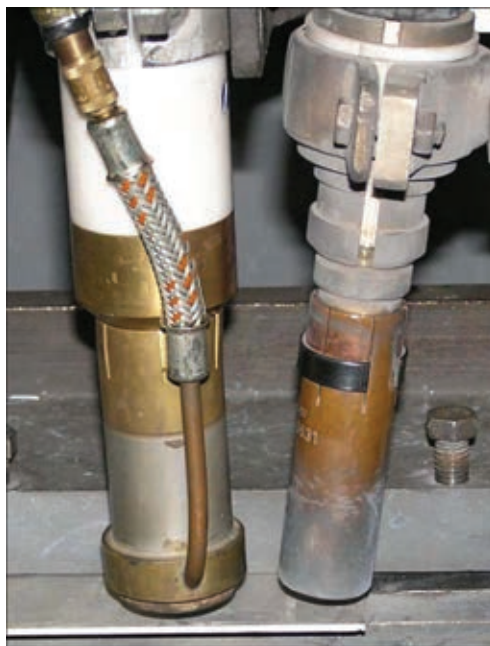


Рис. 11. Размещение плазмотрона и горелки плавящегося электрода при комбинированном использовании плазменно-дуговой сварки и дуговой сварки плавящимся электродом

пользование для формирования сварочной ванны одновременного горения в общую ванну нескольких источников нагрева, таких как сжатая дуга неплавящегося электрода и дуга плавящегося электрода (рис. 13). Этот процесс за рубежом получил название Plasma-MIG. Упоминание о данном процессе относится к 1970-м годам, а первый патент на этот способ сварки принадлежит фирме «Philips Corporatins» [34]. Дуга плавящегося электрода горит внутри сжатой дуги неплавящегося электрода. На данный момент существуют две ос-

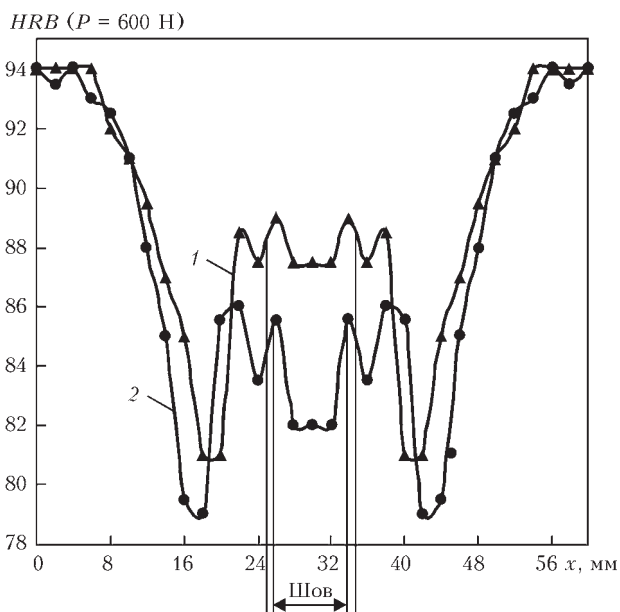


Рис. 12. Твердость наплавок на сплав АМг6Н толщиной 12 мм, полученных при комбинированном использовании плазменно-дуговой сварки и сварки плавящимся электродом (1) и обычной сваркой плавящимся электродом (2) (присадочная проволока марки СвАМг6)

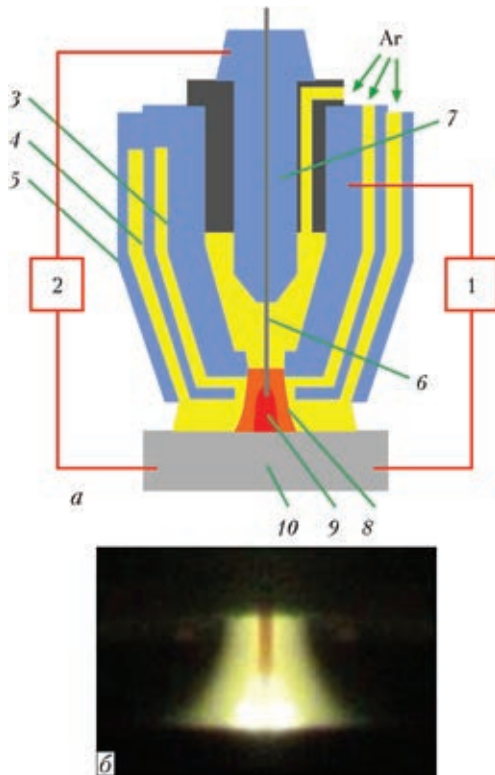


Рис. 13. Схема процесса (а) и внешний вид дуги плазменной сварки плавящимся электродом: 1 — источник питания сжатой плазменной дуги; 2 — источник питания МИГ-дуги; 3 — неплавящийся электрод; 4 — стабилизирующее сопло; 5 — защитное сопло; 6 — плавящийся электрод; 7 — токоподвод; 8 — сжатая плазменная дуга; 9 — МИГ-дуга; 10 — изделие

новые схемы реализации этого процесса сварки — с кольцевым анодом (рис. 14) и с боковым расположением анода (рис. 15). Такое гибридное использование обеих дуг позволяет уменьшить разбрызгивание электродного металла, повысить глубину проплавления и скорость сварки, использовать процесс для выполнения сварки толстых деталей с разделкой кромок.

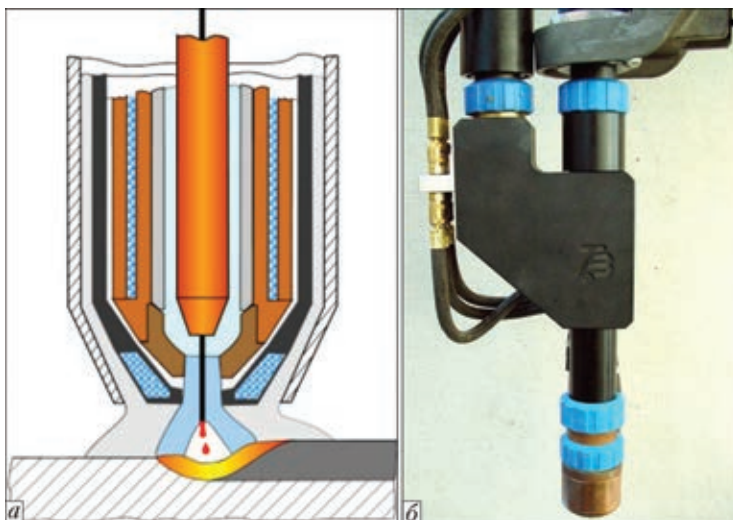


Рис. 14. Схема процесса гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом с кольцевым пустотелым анодом и аксиальной подачей электродной проволоки (а) и сварочная головка PLM 500 фирмы «ТБИ» для гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом (б)

Исследования гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом проводятся во многих университетах мира, в частности, в Техническом университете города Хемниц (Германия). Там было разработано устройство, обеспечивающее включение и совместную работу источников питания для плазменно-дуговой сварки неплавящимся электродом на постоянном токе при обратной полярности и источника питания для сварки плавящимся электродом на постоянном токе при обратной полярности [35]. Исследования такой же направленности проводятся и в SLV Muenchen (Германия). Аналогичные исследования проводятся в Пермском государственном университете (Россия) [36, 37]. В Украине вопросами плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом занимались в Приазовском техническом университете [38].

Особенности процесса плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом также изучались в Китае, Японии и Бразилии [39, 40].

Фирма «ТБИ» (Германия) наладила выпуск по индивидуальным заказам горелок PLM 500 и PLM 600 с кольцевым анодом для плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом, которая выдерживает токовую нагрузку до 250 и 300 А постоянного тока при обратной полярности соответственно отдельно для плазменной части горелки и узла плавящегося электрода (рис. 14).

Израильская фирма «Plasma Laser Technologies Ltd» предложила процесс гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом под названием Super-MIG, который подразумевает одновременное горение в одну общую ванну сжатой дуги неплавящегося электрода и дуги плавящегося электрода. При этом дуга плавящегося электрода горит сбоку от дуги неплавящегося электрода (рис. 15) [41].

Несмотря на большой интерес к процессу гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом с осевой подачей электродной проволоки серийный выпуск оборудования для реализации такого процесса не налажен. Такое оборудование имеет ограниченный набор функций, что значительно сужает технологические возможности и применение данного процесса.

В 2014–2015 гг. в ИЭС им. Е.О. Патона в рамках сотрудничества по проектам Китайско-украинского института сварки (КНР) разработан универсальный комплекс оборудования для плазменно-дуговой, комбинированной и гибридной сварки PLAZER PW-HYBRID TC. Производитель оборудования — ТОВ «Научно-производственный центр «ПЛАЗЕР»

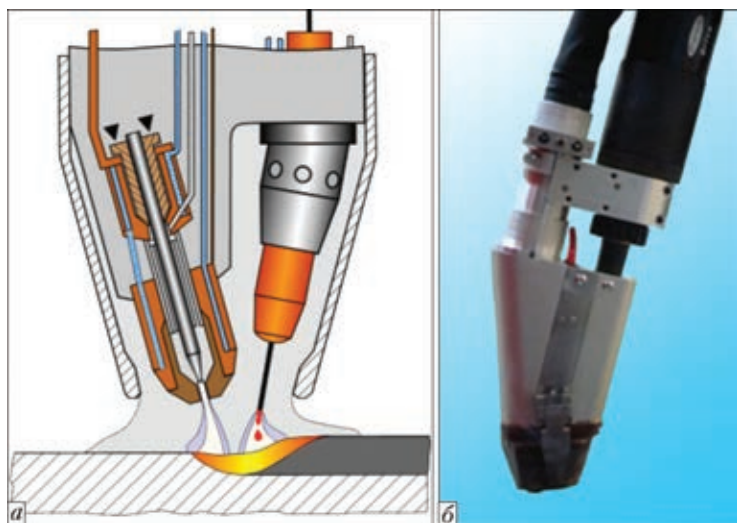


Рис. 15. Схема процесса (а) и сварочная горелка для процесса Super-MIG (б)

(Украина) (рис. 16). Данный комплекс оборудования позволяет реализовать широкий спектр плазменных и дуговых процессов: выполнять плазменно-дуговую сварку с присадочной проволокой постоянным током при прямой и обратной полярностях и разнополярным асимметричным током, гибридную плазменно-дуговую сварку плавящимся электродом с кольцевым анодом плазмотрона и с аксиальной подачей электродной проволоки, комбинированную сварку сжатой дугой и плавящимся электродом, сварку в режиме «мягкая плазма» (Soft Plasma Arc Welding), автоматическую сварку плавящимся и неплавящимся электродом.

Для реализации такого набора технологических возможностей данное оборудование выпол-

нено в блочно-модульном исполнении и включает следующие основные единицы:

- систему управления процессом сварки, обеспечивающую управление источниками питания, механизмами подачи присадочной проволоки, блоками автономного охлаждения, универсальным многопозиционным манипулятором для выполнения различных способов сварки;
- инверторный источник электропитания сварочного плазмотрона;
- инверторный источник электропитания плавящегося электрода;
- блок согласования работы источников питания плазменной сварки и сварки плавящимся электродом в режимах «Плазма + МИГ» — «гибридная и комбинированная плазменно-дуговая сварка плавящимся электродом»;
- блок плазмотрона для машинной гибридной плазменно-дуговой сварки «Плазма-МИГ» с осевой подачей проволоки с кабель-шланговым пакетом;
- моноблок для комбинированной сварки «Плазма + МИГ» с кабель-шланговым пакетом;
- механизм подачи присадочной проволоки для плазменно-дуговой гибридной сварки «Плазма-МИГ»;
- механизм подачи электродной проволоки для плазменно-дуговой гибридной сварки плавящимся электродом «Плазма + МИГ»;
- блок автономного охлаждения плазмотрона и горелки для сварки плавящимся электродом;
- многопозиционный сварочный манипулятор для плазменной гибридной сварки в нижнем положении, на вертикальной плоскости (включая выполнение вертикальных и горизонтальных швов на вертикальной плоскости), а также для сварки цилиндрических деталей.

Кроме того, в функциях данного оборудования заложена возможность работы в комплексе со сварочным роботом вместо сварочного манипулятора. Для этого в системе управления установкой и в источниках электропитания предусмотрен интерфейс для подключения к роботу с протоколами связи, применяемыми для основных типов передовых сварочных роботов.

Данный комплекс оборудования PLAZER PW-HYBRID TC позволяет выполнять швы в нижнем положении, вертикальные и горизонтальные швы на вертикальной и наклонной плоскостях. Наличие в его составе поворотного сварочного вращателя позволяет выполнять сварку кольцевых швов выше перечисленными способами (рис. 16). Комплекс укомплектован плазмотронами для сварки



Рис. 16. Внешний вид универсального комплекса оборудования для плазменно-дуговой, комбинированной и гибридной сварки в разных пространственных положениях PLAZER PW-HYBRID TC

неплавящимся и плавящимся электродами разработки ИЭС им. Е.О. Патона (рис. 17).

В заключение можно отметить следующее. Плазменно-дуговая сварка алюминиевых сплавов развивалась как продолжение аргонодуговой сварки неплавящимся электродом переменным синусоидальным током. Так, первые аппараты создавались на базе источников питания для сварки неплавящимся электродом переменным током. Однако ненадежность горения дуги переменного синусоидального тока при переходе через нулевую линию и значительный разогрев электродного узла в плазмотроне ограничило возможность широкого распространения плазменно-дуговой сварки на переменном синусоидальном токе промышленной частоты как на территории бывшего Советского Союза, так и за рубежом.

Следующим этапом развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов является использование в качестве питания сжатой дуги постоянного тока при обратной полярности. Данный процесс имеет ряд преимуществ: простота исполнения оборудования, хорошая очистка поверхности алюминиевых сплавов и сварочной ванны от включений оксидной пленки. К недостаткам этого процесса стоит отнести большую ширину сварных швов, повышенную склонность к образованию водородной пористости, значительный перегрев электродного узла плазмотрона, что обуславливает увеличение габаритов плазмотрона, а также повышенное блуждание сжатой дуги постоянного тока при обратной полярности при малых амплитудных значениях тока. В данный момент данный способ сварки используется эпизодически как в производственных, так и в исследовательских целях.

Разработка следующего поколения источников питания с прямоугольной формой волны тока для плазменно-дуговой сварки позволило в широком диапазоне регулировать как амплитуду тока прямой и обратной полярностей, длительность протекания тока при прямой и обратной полярности, а также частоту разнополярного тока. Близкая к прямоугольной форма волны сварочного тока упростила процессы возбуждения дуги неплавящегося электрода в полупериод обратной полярности при переходе ее через нуль. Появление источников питания с возможностью создания амплитудной и временной асимметрии сварочного тока дало новый импульс к развитию плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов. В частности, способ сварки VPPA был основным при изготовлении в 1980-1990-х годах баков из алюминий-литиевых высокопрочных сплавов для криогенного топлива космической системы Space Shuttle.



Рис. 17. Плазмотроны разработки ИЭС им. Е.О. Патона для плазменно-дуговой сварки неплавящимся (а) и гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся (б) электродами

Упрощение конструкции оборудования для плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током, а также уменьшение его стоимости является благоприятным фактором для внедрения плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током не только в аэрокосмической отрасли, но и в других отраслях машиностроения. Положительное влияние оказывает и переход от специализированных установок для плазменно-дуговой сварки к модульному построению комплекса оборудования для плазменно-дуговой сварки на основе серийных источников для сварки неплавящимся электродом. Модульное построение при создании комплекса оборудования позволяет более четко подстраиваться под технические задачи производства.

Дальнейшим перспективным направлением развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов является комбинированное и гибридное использование двух и более источников нагрева при формировании сварного соединения. Это позволит увеличить скорость сварки, уменьшить разбрызгивание электродного металла, снизить уровень деформаций сварных конструкций. Одним из перспективных направлений является гибридная плазменно-дуговая сварка плавящимся электродом с кольцевым полым анодом плазмотрона и аксиальной подачей электродной проволоки.

1. Pat. № 2806124 US. Arc torch and process / R.M. Gage. – Date of Pat.: 10 Sept. 1957.
2. Lathi K., Jenström P. Plasma Welding Aluminium // *Svetaren*. – 1999. – № 3. – P. 26–28.
3. Dzelnitzki D. Aluplasmaschweissen: Gleich- oder Wechselstrom? // *Technica (Suisse)*. – 2000. – 49, № 10. – S. 44–53.
4. Сварка сжатой дугой на переменном токе / Дудко Д.А., Лакиза С.П., Виноградский Ф.М., Корниенко А.Н. // *Автомат. сварка*. – 1966. – № 7. – С. 47–49.

5. Дудко Д.А., Корниенко А.Н. Тепловая эффективность процесса сварки плазменной дугой переменного тока // Там же. – 1967. – № 11. – С. 27–30.
6. Рубинчик Ю.Л. Механизированная сварка корпусных конструкций из алюминиевых сплавов. – Л.: Судостроение, 1974. – С. 136.
7. Cooper G., Palermo J., Browning J.A. Recent Developments in Plasma Welding // Welding J. – 1965. – 44, № 4. – P. 268–276.
8. Быховский Д.Г., Беляев В.М. Особенности формирования швов при сварке плазменной (сжатой) дугой обратной полярности // Свароч. пр-во. – 1971. – № 9. – С. 25–26.
9. Быховский Д.Г., Беляев В.М. Энергетические характеристики плазменной дуги при обратной полярности // Автомат. сварка. – 1971. – № 5. – С. 27–30.
10. Применение плазменно-дуговой сварки при производстве криогенного оборудования из алюминиевых сплавов / С.А. Некрасов, Г.П. Салкин, А.С. Бычков, В.И. Астахин // Свароч. пр-во. – 1976. – № 4. – С. 16–17.
11. Горбач В.Д., Бочкарев В.П., Назарук В.К. Технология плазменной сварки алюминиевых сплавов // Мир сварки. – 2009. – № 3. – С. 22–25.
12. Киселев Г.С. Разработка технологии плазменной сварки алюминиевого сплава АМг5 с импульсной подачей плазмообразующих газов // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тула, 2010 – 20 с.
13. Татаринов Е.А., Киселев Г.С. К расчету вольт-амперной характеристики плазменной сварки при импульсной подаче аргона или гелия // Сварка и диагностика. – 2009. – № 5. – С. 11–14.
14. Пат. № 2351445 Россия. Способ сварки плазменной дугой / С.Л. Бычковский, О.М. Новиков, Э.П. Радько и др.; Заявка 2007121870/02 от 14.06.2007.
15. Ruge J., Lutze P., Norenberg K. Eignung von Aluminiumdruckguss zum Plasma- und Elektronenstrahlschweißen – Entgasungsmechanismen und Nahtgüte // Schweissen und Schneiden. – 1989. – 43, № 7. – S. 327–332.
16. Pat. № 6215089 B1 U.S. Plasma welding Torch. / G. Schweinhart. – Date of Pat. 10 Apr. 2001.
17. А. с. № 221477 МПН В 23k9/16. Способ плазменной сварки / Б.Е. Патон, Д.А. Дудко, В.С. Гвоздецкий и др.; Заявка № 1164345/25–27 от 17.06.1967.
18. Свидетельство о регистрации торговой марки «VPPA» № 73735584 // <http://www.tmfile.com/mark/?q=737355845> последнее обращение 16.07.2015 г.
19. J. Micheli, C. Pilcher. Advanced variable-polarity plasma arc welding // The Fabricator. – 2000. – № 11.
20. Nunes A.C., Bayless O.E., Jones C.S. The Variable Polarity Plasma Arc Welding process: its application to the Space Shuttle external tank — first interim report // George C. Marshall Space Flight Center. – 1983. – June. – 45 p.
21. Clover F.R. Welding of the External Tank of the Space Shuttle // Welding J. – 1980. – 54, № 8. – P. 17–26.
22. Tomsis M., Barhorst. Keyhole plasma arc welding of aluminum with variable polarity power // Ibid. – 1984. – 63, № 3. – P. 25–32.
23. Lockheed Martin michoud space systems // Weld. Des. and Fabr. – 1998. – 71, № 11. – P. 32.
24. Брик Е.Ю. Сварка алюминиевых сплавов плазменной дугой переменного тока // I Междунар. конф. мол. ученых в обл. сварки и смеж. технологий: Тез. докл., Киев, 16–20 мая 1989 г. – Киев, 1989. – С. 91–92.
25. Источник питания дежурной дуги для плазменной сварки алюминия разнополярным током / А.Г. Запарованый, Г.Н. Игнатченко, Л.М. Яринич, Е.Ю. Брик // Автомат. сварка. – 1989. – № 9. – С. 73–74.
26. Лабур Т.М., Гринюк А.А., Покляцкий А.Г. Механические свойства сварных соединений алюминий-литиевых сплавов, полученных плазменной сваркой // Там же. – 2006. – № 6. – С. 40–43.
27. Особенности микромеханизма разрушения соединений алюминий-литиевых, полученных плазменной сваркой / Т.М. Лабур, А.А. Гринюк, Т.Г. Таранова и др. // Там же. – 2007. – № 9. – С. 16–22.
28. Гибридная лазер-плазменная сварка алюминиевых сплавов / И.В. Кривцун, В.Д. Щелягин, В.Ю. Хаскин и др. // Там же. – 2007. – № 5. – С. 49–53.
29. Properties and structure of hybrid laser-plasma welded joints in aluminium alloys / Ternovoj E.G., Shulym V.F., Khaskin V.Yu. et. al. // The Paton Welding J. – 2007. – № 11. – P. 10–15.
30. V. Wesling, A. Schräm, A. Bock, D. Wocilka. Plasmapulververbindungsschweißen von Aluminumblechen // Praktiker. – 2004. – № 10. – S. 288–294.
31. Untersuchung der metallurgischen Grundlagen zum Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen dünner Aluminumbleche // Schlussbericht für den Zeitraum: 1.6.2003 bis 31.5.2005. – AiF-Vorhaben-Nr. 13.770 B / 4. – Technische Universität Ilmenau. – Ilmenau, – 9.2005. – 73 S.
32. Zhang Y.M., Zhang S.B. Double Side Arc Welding Increases Weld Joint Penetration // Welding J. – 1998. – № 6. – P. 57–61.
33. Moulton J.A., Weckman D.C. Double Side Arc Welding of 5182-O Aluminum Sheet for Tailored Welded Blank Applications // Ibid. – 2010. – № 1. – P. 11–23.
34. Pat. № 3809824 U.S. Method of Plasma-MIG Welding. Date of Pat.: 24 June. 1975 / U.S. Philips Corporation.
35. Matthes K.-J., Kusch M. Plasma-MIG-Schweißen // Praktiker. – 2000. – № 5. – S. 182–188.
36. Щицын Ю.Д., Тюткин Ю.М. Плазменная сварка плавящимся электродом алюминиевых сплавов // Свароч. пр-во. – 1986. – № 5. – С. 1–2.
37. Плазменная сварка алюминиевых сплавов / Ю.Д. Щицын, В.Ю. Щицын, Х. Херольд, В. Вейнгарт // Там же. – 2003. – № 5. – С. 36–42.
38. Макаренко Н.А., Неведомский В.А. Термические циклы при Плазма-МИГ наплавке // Автомат. сварка. – 2003. – № 1. – С. 45–47.
39. Yan B., Hong-Ming G., Ling Q. Droplet transition for plasma-MIG welding on aluminium alloys // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2010. – Vol. 20 – P. 2234–2239.
40. Tiago Vieira da Cunha, Jair Carlos Dutra. Processo Plasma-MIG – Contribuição do Arco Plasma na Capacidade de Fusão do Arame // Soldagem Insp. São Paulo. – 2007. – 12, № 2. – P. 89–96.
41. Hybrid Welding: An alternative to SAW // Welding J. – 2007. – № 10. – P. 42–45.

Поступила в редакцию 21.07.2015

ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОВЫХ СИСТЕМ N–O–C–H ДЛЯ СИНТЕЗА УПРОЧНЯЮЩИХ КОМПОНЕНТ В ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЯХ

В.Н. ПАЩЕНКО

НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, г. Киев-56, пр-т Победы, 37. E-mail: vn.paschenko@ukr.net

Рассмотрена возможность синтеза упрочняющих компонент в процессе плазменного напыления с использованием плазмохимического реактора. Проведен термодинамический анализ систем, базирующихся на баллонных газах N_2 , CO_2 , C_3H_8 – C_4H_{10} , CH_4 , а также воздухе (смеси N_2 и O_2) и ряда порошковых материалов. В качестве модельных выбранные материалы на основе железа и порошки с достаточно большим содержанием титана. Показана принципиальная возможность получения карбидов, нитридов и оксидов в конденсированном состоянии, установлены диапазон термодинамических параметров, в котором они существуют, зависимость содержания синтезированных соединений в системе от температуры процесса, давления и количества исходного твердого продукта. Установлено, что организация процесса напыления с сопутствующим синтезом упрочняющих компонент невозможна без наличия объективной информации об энергетических возможностях комплекса плазменного оборудования «плазмотрон–плазмохимический реактор». Проведен цикл экспериментов по напылению плазменных покрытий и испытаний на их стойкость к абразивному износу. Библиогр. 8, рис. 6.

Ключевые слова: сложные газовые системы, плазмтроны, плазмохимический реактор, плазменное напыление, синтез упрочняющих компонент

Возрастающие требования к эксплуатационным свойствам деталей и конструкций вызывают необходимость усложнения составов материалов, из которых формируются функциональные поверхностные слои. Традиционно идут по пути усложнения химического состава исходного материала введением легирующих элементов или использования композиционных материалов [1, 2]. Альтернативой может быть совмещение плазменного напыления с целевыми химическими превращениями [3].

Применение сложных плазмообразующих смесей дает потенциальную возможность прохождения реакций взаимодействия активных газовых составляющих плазмы с исходным материалом, результатом которого может быть синтез упрочняющих компонент в создаваемом покрытии [4, 5]. Например, в работе [6] ультрадисперсные частицы нитрида титана были обнаружены на сплетях, полученных с использованием плазмохимического реактора в условиях сверхзвукового напыления в азотной атмосфере. Анализируя возможные варианты формирования упрочняющих компонент, которые можно синтезировать в плазмообразующих средах системы N–C–H–O, N–C–H или N–O, и принимая в расчет условие доступности исходных материалов, на основе которых будет осуществляться синтез, был выбран ряд порошков. Эти материалы серийно выпускаются и присутствуют на рынке Украины [7]. Условно их можно разделить на четыре основные группы:

материалы на основе железа (ПЖ Р3, самофлюсующиеся на основе железа), в которых возможно образование карбидов железа и, частично, карбидов кремния и хрома (в случае наличия этих элементов в исходном материале); в альтернативном случае исходный материал может упрочняться синтезированными оксидами железа;

материалы на основе никеля (ПГ-10Н-03, ПХ40Н60, ПГ-СР3, ПГ-СР4, ПГ-19Н-01), в составе которых достаточно высокое содержание карбидообразующих компонент — хрома, кремния, бора;

материалы, которые содержат значительное количество титана (ПТ65Ю35, ПН55Т45) и в которых возможен синтез нитридов и карбидов;

материалы на основе алюминия (ПАД, АСД-Т, ПТ65Ю35, ПН70Ю30), в которых при определенных условиях возможно появление упрочняющих компонент из оксида алюминия.

Термодинамические расчеты проводили с использованием программного комплекса «TERRA». Исследовали системы, которые базируются на упомянутых выше материалах для напыления и баллонных газах N_2 , CO_2 , C_3H_8 – C_4H_{10} , CH_4 , а также воздухе (смеси N_2 и O_2). Выявлялась принципиальная возможность получения карбидов, нитридов и оксидов в конденсированном состоянии, а также диапазон термодинамических параметров, в котором они существуют, и зависимость содержания этих соединений в системе от температуры процесса, давления и количества исходного твердого продукта.

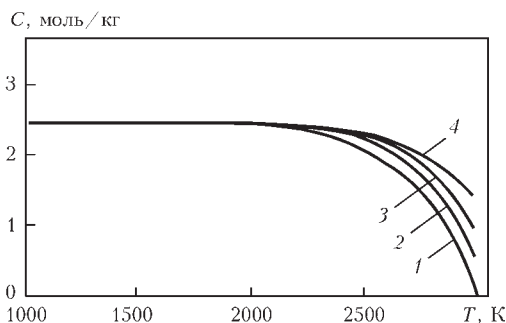


Рис. 1. Зависимость выхода целевого продукта от температуры процесса (40,39 % Fe, 35,38 % N₂, 24,23 % C₃H₈): 1 — давление 0,1 МПа; 2 — 0,3; 3 — 0,3; 4 — 0,4

Особое внимание уделено двум материалам, которые выбраны в качестве модельных: Fe и Ni-Ti. Целевым продуктом, который будет синтезироваться при напылении порошка на основе железа, назначаем карбид железа Fe₃C. Синтез Fe₃C возможен при наличии в системе достаточного количества углерода и недопущения связывания его кислородом плазменной среды. Среди возможных вариантов состава реакционной среды, которые были исследованы, наиболее эффективным оказался состав, который создавался плазмообразующим азотом и пропаном. Пропан подавался в предварительно сформированный газопорошковый поток в пределах плазмохимического реактора.

На рис. 1, 2 показаны зависимости выхода конденсированной фазы карбида железа в зависимости от температуры ведения процесса и давления в реакционном объеме. Из представленных зависимостей видно, что температурный диапазон выхода целевого продукта (конденсированной фазы Fe₃C) зависит от содержания углеводородного газа в реакционной среде. В пределах этого диапазона температур уровень выхода целевого продукта практически не меняется.

Диапазон температур максимально широкий в случае содержания углеводородного газа (19...25 мас. %) и сужается в случае выхода из этого интервала с появлением явного максимума выхода продукта при температуре 1800...1900 К. Превышение уровня температуры 2500 К резко снижает выход продукта. Установлено, что давление в зоне прохождения плазмохимической реакции практически не влияет на выход целевого продукта в пределах рабочего температурного диапазона прохождения процесса и существенно влияет на границах температурного диапазона. На рис. 3 показаны зависимости выхода целевого продукта от количества загруженного исходного материала при условии неизменного количества газовой фазы и выхода целевого продукта от количества углеводородного газа, поданного в зону реакции.

Увеличение содержания углеводородного компонента от 8,6 до 12,4 мас. % увеличивает выход

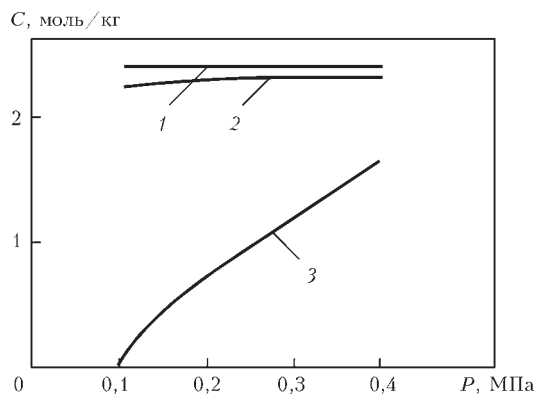


Рис. 2. Зависимость выхода целевого продукта от давления в реакционном пространстве: 1 — $T = (1000...2000) \text{ К}$; 2 — 2500; 3 — 3000 (40,39 % Fe, 35,38 % N₂, 24,23 % C₃H₈)

карбида практически вдвое, но дальнейшее увеличение количества углеводородного газа в системе практически не приводит к повышению производительности процесса синтеза.

Увеличение количества загруженного исходного материала, исходя из результатов расчетов, уменьшает количество синтезированного продукта (при условии сохранения неизменными значений других режимных параметров).

Наличие в составе сплава ПН55Т45 значительного (до 45 мас. %) количества титана создает предпосылки для возможного синтеза нитрида титана (TiN). Высокая химическая активность тита-

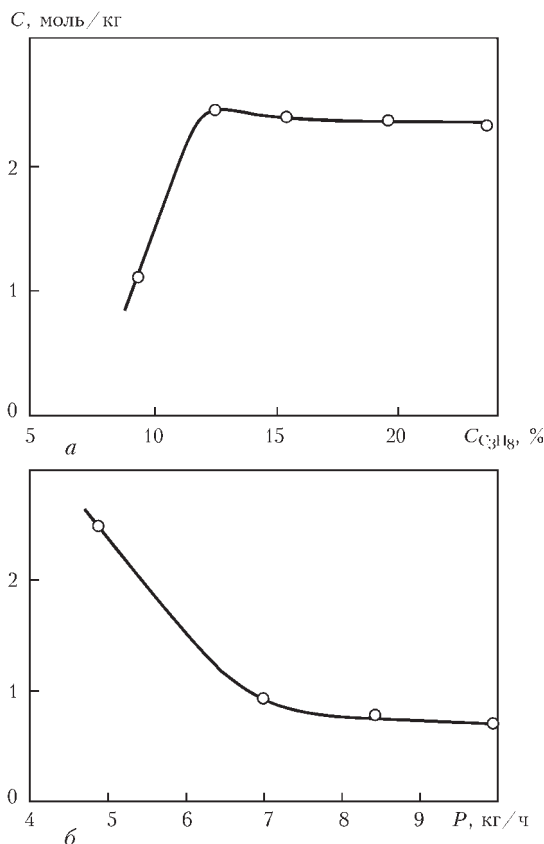


Рис. 3. Зависимость количества синтезированного карбида от содержания пропана в реакционной среде (а) и количества загруженного дисперсного материала (б)

на предъявляет повышенные требования к составу реакционной среды. Предварительные оценки показывают целесообразность использования плазмообразующего азота с целью создания условий для синтеза нитрида титана, с последующим добавлением реакционного азота в предварительно сформированный газопорошковый поток в пределах плазмохимического реактора.

Согласно расчетам, температурный диапазон выхода целевого продукта (конденсированной фазы TiN) зависит от соотношения между взаимодействующими твердой и газовой фазами и в исследованном диапазоне изменения этого соотношения сужается при уменьшении содержания газовой фазы. Повышение содержания азота от 75,77 до 86,22 мас. % расширяет температурный диапазон на 100 К. В этом случае абсолютное значение количества синтезированного нитрида возрастает.

Повышение давления в реакционном пространстве расширяет температурный диапазон существования конденсированной фазы нитрида титана. Таким образом, процесс нагревания дисперсного Ni-Ti в пределах плазмохимического реактора целесообразно проводить при содержании азота 75...85 мас. %, в диапазоне температур 2000...2400 К и давлении в реакционной среде около 0,1 МПа. В этих условиях необходимая фиксация синтезированного продукта осуществляется подачей в конечную часть реактора закалочного азота.

Процесс нанесения покрытия с одновременным синтезом упрочняющих компонент реализуется в специальном устройстве для напыления, которое состоит из плазменного распылителя и плазмохимического реактора, герметично и жестко объединенных в один агрегат.

Исходный материал вместе с транспортирующим газом подается в дуговой канал плазмотрона. Через сопловое отверстие выходного электрода в реакционное пространство (в пределах плазмохимического реактора) вытекает струя высокотемпературного газа, в которой нагревается и ускоряется дисперсный материал.

В процессе нагрева с повышением температуры материал поверхностного слоя частиц исходного материала испаряется с образованием паровой рубашки вокруг жидкого или пластичного ядра. За срезом сопла плазмотрона в реакционное пространство подается дополнительный газ, в результате взаимодействия с которым в паровой фазе, окружающей частицы, начинается синтез соответствующего химического соединения. Часть синтезированной упрочняющей компоненты может конденсироваться на поверхности частиц-носителей, другая часть находится в газовой фазе вокруг ядра.

На выходе реакционной зоны в агрегат подается закалочный газ, который, снижая темпера-

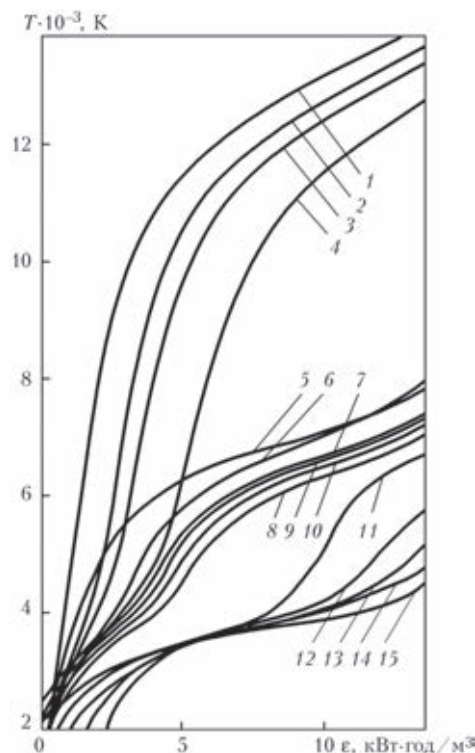


Рис. 4. Зависимость среднemasовой температуры плазменной струи от удельного вклада энергии в плазмообразующий газ: 1 — Ar; 2 — 85 % Ar + 15 % H₂; 3 — 75 % Ar + 25 % H₂; 4 — 50 % Ar + 50 % H₂; 5 — N₂; 6 — воздух; 7 — воздух + CH₄, α = 1; 8 — воздух + CH₄, α = 0,4; 9 — воздух + CH₄, α = 0,8; 10 — воздух + CH₄, α = 0,6; 11 — CO₂; 12 — продукты углекислотной конверсии природного газа; 13 — NH₃; 14 — продукты паровой конверсии природного газа; 15 — H₂O

туру системы, создает условия для конденсации образованного тугоплавкого соединения на поверхности частиц-носителей. При этом сама частица остается в жидком или пластичном состоянии, что способствует процессу перемешивания жидкого поверхностного слоя частиц с конденсированным соединением и коагуляции синтезированных ультрадисперсных частиц с частицами исходного материала.

Химический состав упрочняющих компонент зависит от химического состава исходного материала, плазмообразующего, транспортирующего, реакционного и закалывающего газов.

Процесс синтеза упрочняющих компонент покрытия в ходе нагрева и ускорения исходного материала предусматривает использование плазменных генераторов, способных создавать потоки низкотемпературной плазмы из сложных, химически активных газовых плазмообразующих смесей в широком диапазоне изменения энергетических параметров и, в частности, удельной энтальпии. При этом компоненты потока плазмы должны принимать участие в синтезе или, в крайнем случае, не препятствовать его прохождению.

Успешная практическая реализация процесса возможна при наличии достаточно полной ин-

формации об энергетических характеристиках используемого плазмотрона и их взаимосвязи с режимными параметрами генерации плазмы. Комплексные исследования упомянутых характеристик плазмотронов, генерирующих плазму системы N–O–C–H [8], позволили применить именно эту газовую систему для получения упрочненных плазменных покрытий. В конкретном случае применен двухэлектродный плазмотрон прямой полярности со ступенчатым анодом общей мощностью до 35 кВт, способный устойчиво работать на азоте, воздухе и смесях воздуха с углеводородными газами (метаном, пропаном, бутаном).

По результатам исследований этой конструкции была установлена критериальная зависимость удельной энтальпии от режимных и геометрических параметров работы плазменного распылителя. Эта зависимость является основой для предварительного расчета режимных параметров ведения процесса, при которых возможен синтез упрочняющих компонент с максимальным выходом синтезируемого продукта в процессе нанесения покрытия.

В упрощенном виде (для примененной конструкции) в случае использования воздуха критериальная зависимость имеет вид:

$$\varepsilon = 3,984 I^{0,648} Q_{\text{воз}}^{-0,33} d_1^{0,092} d_2^{-0,035} p^{0,357}, \quad (1)$$

где Q — расход плазмообразующего газа, м³/ч; d_1 и d_2 — соответственно диаметры узкой и широкой части дугового канала выходного электрода, мм; p — давление на входе в плазмотрон, Н/м²; I — ток дуги, А.

Для азота:

$$\varepsilon = 3,684 I^{0,66} Q_{\text{азот}}^{-0,318} d_1^{0,092} d_2^{-0,058} p^{0,357}. \quad (2)$$

Для смеси углеводородных газов с воздухом (без горения в пределах плазмохимического реактора):

$$\varepsilon = 0,273 I^{0,6} Q_{\Sigma}^{-0,214} d_1^{-0,297} d_2^{0,303} p^{0,633} (l/l_1)^{-0,034} n^{0,099}. \quad (3)$$

Для смеси углеводородных газов с воздухом (с протеканием процесса горения компонентов смеси в пределах плазмохимического реактора):

$$\varepsilon = [0,273 I^{0,6} Q_{\Sigma}^{-0,214} d_1^{-0,297} d_2^{0,303} p^{0,633} (l/l_1)^{-0,034} n^{0,099}] + [0,0895 a Q_{\text{вт}} I^{-0,132} Q_{\Sigma}^{-0,69} d_1^{-0,119} d_2^{-0,059} p^{0,241} (l/l_1)^{0,079} n^{0,064}]. \quad (4)$$

Плазмохимический реактор представляет собой систему последовательно и плотно соединенных между собой отдельных секций. Используются секции двух видов: секции для подачи реакционных газов и проходные секции, назначение которых создание определенного реакционного объема. Каждая проходная секция имеет индивидуальное водяное охлаждение. Секции для подачи газов охлаждаются самими газами, кото-

рые через них подаются. Геометрические размеры и конфигурация всех секций (кроме первой) унифицированы, что позволяет менять общую длину реактора увеличением количества проходных секций. Соответственно, местоположение секций для подачи газов в пределах реактора также может меняться, в зависимости от потребностей процесса.

Продольный геометрический размер внутреннего пространства реактора (время пребывания в реакционной зоне частиц материала) определяется количеством секций, задействованных в конструкции.

Диаметр реакционной зоны был выбран постоянным, на основании предварительной информации об угле раскрытия гетерогенного потока в процессе напыления плазмотроном использованной конструкции (исходя из условия исключения налипания дисперсного материала на внутреннюю стенку реактора в ходе проведения процесса). Общая схема технологического процесса напыления практически не отличается от традиционного процесса плазменного напыления, хотя отдельные стадии имеют определенную специфику их проведения.

Типичная подготовка исходного материала предусматривает обычно просушивание порошка и просеивание его с целью очистки от возможных загрязнений и выделения фракций определенного диапазона, пригодных для формирования покрытия. Предлагаемый процесс предусматривает применение существенно более узкого диапазона возможных размеров отдельных частиц. Сужение диапазона повышает стабильность и прогнозируемость процесса синтеза упрочняющих компонент, поскольку он проходит в паровой рубашке вокруг частиц. Уменьшение размера частиц исходного порошка может привести к полному испарению частицы, а увеличение — к недостаточному ее прогреву и замедлению процесса испарения поверхностного слоя.

Ужесточаются требования к температурному режиму основы. Тепловая изоляция струи плазмы от окружающей среды стенками реактора способствует сохранению высокого уровня тепловых потоков в основу на дистанциях напыления. Это ведет к перегреву основы, ускорению процессов наращивания оксидной пленки на поверхности изделия и, как следствие, снижению прочности сцепления покрытия с основой. В случае применения углеводородных компонентов газовой смеси, фрагменты которых догорают на выходе из реактора в процессе подсасывания кислорода воздуха, необходимы дополнительные меры по интенсификации охлаждения изделия — природного охлаждения становится недостаточно. При этом повышаются требования к стабильности параметров плазменного распылителя и системы подачи исходного материала. Случайное изменение расхода

транспортирующего газа и количества дисперсного материала нарушает пространственное размещение газопорошкового потока в пределах плазмохимического реактора, приводит к осаждению частиц порошка на стенках реактора, дестабилизирует процесс плазмохимического синтеза.

Процесс синтеза также чувствителен к смене энергетического уровня рабочего тела и может быть нарушен вследствие нестабильности входных параметров распылителя и разрушения электродов в результате эрозии. Необходимые номинальные режимные параметры генерации гетерогенного потока (ток дуги, расход плазмообразующего газа и его химический состав, давление газов, геометрические размеры дугового канала, расход реакционного и закалочного газов) рассчитываются предварительно.

Основными термодинамическими параметрами, которые определяют вероятность прохождения плазмохимической реакции синтеза упрочняющих компонент (в конденсированном виде) являются давление и среднемассовая температура в реакционном пространстве. Температура, в свою очередь, является производной количества энергии, вложенной в единицу объема (массы) реакционной среды (удельной энтальпии).

Схема предварительного определения режимных параметров ведения процесса может быть следующей:

- исходя из анализа химического состава напыляемого материала и назначенного упрочняющего компонента, определяется элементный состав газовой системы, в которой реализуется процесс;

- элементный состав газовой системы обеспечивается использованием соответствующего плазмообразующего газа, который содержит химические элементы из необходимого перечня, и реакционного газа, который своим химическим составом дополняет систему по перечню химических элементов и их содержанию;

- проводятся термодинамические расчеты созданных систем (учитывая наличие твердой фазы) в широком интервале изменения термодинамических параметров — давления и температуры проведения процесса;

- выявляется полный диапазон значений упомянутых параметров, в котором возможно образование целевого продукта, и значения, при которых выход продукта максимальный;

- определяется (по зависимостям, аналогичным приведенным на рис. 4) необходимое значение удельной энтальпии рассматриваемой газовой системы, которое обеспечивает необходимый уровень температуры процесса (при усло-



Рис. 5. Процесс напыления покрытия

вии соответствующего давления в реакционном пространстве);

- используя уравнения типа (1)–(4) определяются необходимые значения режимных и геометрических характеристик ведения процесса.

Процесс напыления покрытия начинается запуском плазменного распылителя на полной смеси плазмообразующих газов, или на ее основном компоненте, на токе дуги, как правило, ниже номинального. После выведения плазменного распылителя на рабочий режим по току, составу и расходу плазмообразующего газа начинается подача дисперсного материала в реакционное пространство.

Появление на выходе системы «плазматрон–реактор» потока нагретых частиц служит сигналом для начала подачи в реактор реакционного и закалочного газов. При этом визуально меняются размеры и форма газового потока на выходе реактора (рис. 5).

Функциональные свойства покрытий из железного порошка, который на данный момент является самым дешевым исходным материалом для плазменного напыления, можно существенно улучшить, если ввести в состав покрытия карбиды железа или его оксиды, синтезированные в процессе напыления. В зависимости от химического состава целевого продукта осуществляется подбор химического состава реакционной среды. Термодинамические расчеты подтверждают теоретическую возможность синтеза карбидов во время напыления в смеси газов, содержащих углерод.

Аналогичные расчеты показывают теоретическую возможность синтеза оксидов в случае изменения условий напыления.

С целью получения покрытия с синтезированным карбидом железа в железной матрице процесс напыления проводился в азотной плазме с подачей в реакционное пространство карбидообразующего пропан–бутана.

Расход плазмообразующего газа составлял 3,5 м³/ч, расход реакционного газа 0,7 и 1,5 м³/ч, ток дуги 150 А. При этих параметрах напряжение не превышало 105...110 В. Производительность распы-

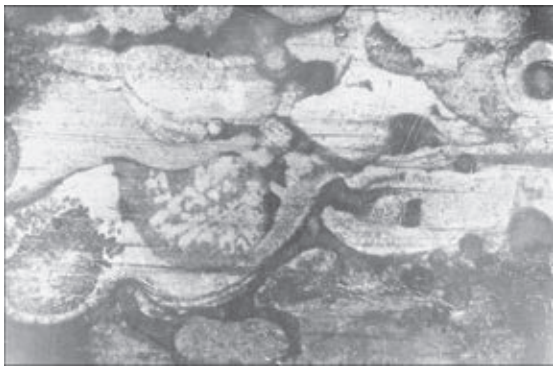


Рис. 6. Микроструктура ($\times 1000$) покрытия, напыленного из материала ПЖ РЗ в сложной газовой системе с использованием плазмохимического реактора

ления материала покрытия 5 кг/ч, основной размер фракции дисперсного материала 63...100 мкм.

Напыляемые образцы устанавливались практически на срезе последней секции плазменного реактора. При этом дистанция напыления составляла 230...250 мм, что существенно выше оптимального значения при напылении по традиционной схеме. Увеличение дистанции во время плазмохимического напыления практически не влияет на значение скорости частиц в момент встречи с поверхностью основы и значительно увеличивает температуру частиц вследствие ограничения подсосывания воздуха из окружающей среды.

На рис. 6 показана микроструктура полученного покрытия. Покрытие имеет характерную слоистую структуру, которая формируется из расплавленных частиц. Одновременно наблюдается присутствие определенного количества частиц глобулярной формы, которые перешли в покрытие из нерасплавленного состояния. Заметны все виды границ и поры.

Кроме соединений, которые синтезировались в газовой фазе в процессе взаимодействия газовой среды с паровой фазой материала и которые коагулируют с частичками-носителями, в ходе напыления имеет место интенсивное поглощение газов расплавленным материалом частиц. В условиях высоких скоростей охлаждения (около 10^5 К/с) растворенные в частицах газы фиксируются в твердом растворе с образованием перенасыщенных твердых растворов. Релаксация метастабильного состояния приводит к выделению в охлаждающихся частицах ультрадисперсных, нанометрового диапазона, избыточных фаз.

Количественный микроанализ микрошлифа образца фиксирует значительное возрастание содержания углерода: от 0,05 % в исходном материале до 5,0...5,6 % в покрытии. Параллельно исследовали образцы с идентичным покрытием в условиях абразивного изнашивания на приборе ЛКИ-3. Нагрузка составляла 150 Н. В качестве абразива применен плавный электрокорунд с основным

размером частиц 300...400 мкм. Установлено, что стойкость образца с покрытием, которое содержит упрочняющую компоненту, в идентичных условиях испытаний превышает стойкость образца, напыленного без прохождения плазмохимической реакции в 7,0...7,5 раз (потеря массы составляла 0,02583 г/м по сравнению с 0,00343 г/м у образца с упрочняющей компонентой).

Выводы

1. Использование плазмообразующих сред системы N–O–C–H создает предпосылки для синтеза упрочняющих компонент (карбидов, нитридов и оксидов) в процессе плазменного напыления защитных покрытий. Термодинамический анализ соответствующих систем позволяет оценить количественные характеристики выхода целевого продукта и энергетические условия ведения процесса.

2. Практическая реализация технологии напыления покрытий с сопутствующим синтезом упрочняющих компонент возможна при наличии объективной информации об энергетических характеристиках использованного плазменного оборудования и закономерностях связи этих характеристик с режимными параметрами ведения процесса.

3. Результаты исследования покрытий из порошка ПЖ РЗ фиксируют резкое (на два порядка) увеличение содержания углерода в покрытии по сравнению с исходным материалом и соответствующее увеличение износостойкости (более чем в 7 раз) в условиях абразивного износа.

1. *Повышение износостойкости плазменных покрытий на основе композиционного порошка с наночастицами SiO₂* / И.В. Смирнов, И.А. Селивестров, А.В. Черный и др. // Вісник Нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». – 2011. – № 2. – С. 70–74.
2. *Сверхзвуковое воздушно-плазменное напыление керметных покрытий системы карбид титана–хрома – нихром* / Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова, М.В. Коломыцев, О.П. Масючок // Автомат. сварка. – 2015. – № 2. – С. 21–27.
3. *Ronald W.S., Emerging U.S. Thermal plasma materials processing research and development* // World progress in plasma applications (Febr. 9–11, 1993). – Palo Alto: CA, 1993. – P. 1–16.
4. *Пащенко В.М., Кузнецов В.Д.* Плазмові джерела теплоти в процесах інженерії поверхні // Проблеми техніки. – 2002. – № 3. – С. 26–32.
5. *Борисов Ю.С., Петров С.В.* Использование сверхзвуковых струй в технологии газотермического напыления // Автомат. сварка. – 1993. – № 1. – С. 24–34.
6. *Петров С.В.* Плазменный синтез в технологии газотермического напыления // Порошковая металлургия. – 1997. – № 9/10. – С. 34–38.
7. *Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник* / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко. Е.Н. Ардаговская. – Киев: Наук. думка, 1987. – 544 с.
8. *Пащенко В.Н.* Влияние состава плазмообразующей воздушно-газовой смеси на параметры струи плазматрона // Автомат. сварка. – 2009. – № 4. – С. 33–38.

Поступила в редакцию 28.09.2015

ОЦЕНКА ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ СПЛАВА Inconel 690

Н.О. ЧЕРВЯКОВ

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

Представлены результаты оценки термонапряженного состояния в сварном соединении никелевого сплава Inconel 690. Выполнен экспериментально-расчетный анализ тепловых процессов и математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при однопроводной сварке. Верификация данных путем сравнения экспериментальных термических циклов с расчетными показала хорошую сходность результатов как по размерам шва, так и по термическим циклам в зонах на различном удалении от линии сплавления. Проанализирована кинетика напряженно-деформированного состояния в различных зонах сварного соединения с учетом возможности образования горячих трещин. Показано, что в условиях моделирования прямолинейной однопроводной сварки пластин толщиной 3 мм при погонной энергии 304 Дж/мм возникающие напряжения и деформации не превышают критических значений, тем самым не создавая условия для образования горячих трещин. Применяемая математическая модель может быть использована при оценке кинетики напряженно-деформированного состояния для различных вариантов сварки (изменение погонной энергии, различных присадочный материал и т.д.). Библиогр. 7, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: дуговая сварка неплавящимся электродом; никелевые сплавы; тепловые процессы; термические циклы; математическое моделирование, напряжения, деформации

Сплавы на никелевой основе играют важную роль как коррозионностойкие материалы в атомной и химической промышленности, в особенности в условиях эксплуатации при высоких температурах, значительных напряжениях и агрессивных средах. Широко используемыми сплавами на никелевой основе в данный момент являются сплавы системы легирования Ni–Cr–Fe. Один из таких сплавов — Inconel 690 с высоким содержанием хрома (30 %) [1]. Сварные соединения сплава Inconel 690 с соответствующими присадочными материалами показали высокую чувствительность к образованию горячих трещин, в особенности в условиях сварки толстостенных элементов конструкций. Наибольшую склонность сплавы проявляют к образованию трещин провала пластичности [2, 3].

Как было показано ранее [4], трещины провала пластичности при сварке сплавов системы легирования Ni–Cr–Fe возникают в температурном интервале 1050...650 °С, величина критической деформации образования трещин $\epsilon_{кр}$ примерно 1,2 %.

Тепловые процессы при сварке плавлением оказывают определяющее влияние на характер и кинетику изменения напряженно-деформированного состояния, структуру и свойства шва и зоны термического влияния. В связи с этим анализ температурных полей при сварке сплавов системы легирования Ni–Cr–Fe с целью дальнейшего исследования кинетики напряженно-деформированного состояния и оценки склонности к образованию горячих трещин является актуальной задачей.

Целью работы был сравнительный экспериментально-расчетный анализ температурных полей и моделирование напряженно-деформированного состояния при однопроводной аргонодуговой сварке сплава Inconel 690.

Компьютерное прогнозирование и расчет позволяют определить температурные поля для различных значений тепловой мощности дуги. Расчетным путем устанавливается коэффициент полезного действия дуги, изменяющийся в зависимости от способа и режимов сварки и т.д. Для уточнения входных данных математической модели требуется экспериментальное построение термических циклов и сравнение их с расчетными значениями.

Регистрация термических циклов сварки проводилась на образцах из никелевого сплава Inconel 690 размером 170×40×3 мм. Выполнялась дуговая сварка вольфрамовым электродом в аргоне без присадки на следующем режиме: $I_{св} = 72$ А, $U_{св} = 10,5$ В, $v_{св} = 7,2$ м/ч. Расход газа при сварке составлял 5 л/мин.

Для измерения термических циклов сварки в зоне термического влияния использовались термопары типа «К» (хромель-алюмель). Диаметр термоэлектродов составлял 0,2 мм, при этом диаметр горячего спая был меньше 0,5 мм. Спай термопары получали путем оплавления термоэлектродов ручной аргонодуговой сваркой. Тарирование термопар осуществлялось по температурам плавления технически чистых алюминия и меди.

Запись термических циклов проводилась в режиме реального времени с помощью АЦП



Рис. 1. Общий вид образца со швом и термопарами после сварки

EXPERT 9018P и специализированного программного обеспечения PowerGraph 3.0, позволяющих автоматически превращать значения термо-ЭДС в температуру.

К поверхности пластин спаи термопар крепились посредством конденсаторной сварки, что обеспечило постоянный стабильный контакт спаев с металлом в широком диапазоне температур. Внешний вид образца с приваренными термопарами после сварки показан на рис. 1.

После сварки шов и термопары в зоне термического влияния фотографировались на бинокулярном микроскопе с 25-кратным увеличением и выполнялось измерение расстояний от линии сплавления до спаев термопар. Кроме того, на макрошлифах измерялись ширина шва и глубина проплавления.

Расчетная оценка термонапряженного состояния выполнялась с применением специализированного программного обеспечения «Сварка никелевых сплавов», созданного на базе алгоритмов, разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона и описывающих распределение температур и напряженно-деформированного состояния вблизи сварочной ванны сложнолегированных сплавов

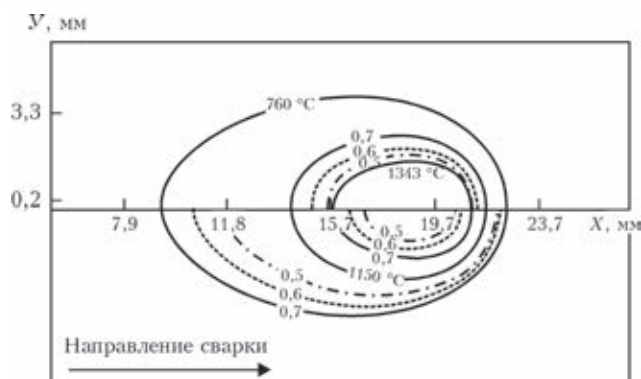


Рис. 2. Влияние значения коэффициента полезного действия дуги на распределения температур в высокотемпературной области. Сплошной линией показаны изотермы для значения коэффициента 0,7, пунктирной — 0,6 и штрихпунктирной — 0,5 соответственно

на основе никеля. Для рассматриваемой пластины в процессе сварочного нагрева определялось температурное поле $T(x, y, z, t)$ во времени. Затем по средним значениям температуры $T(x, y, t)$ решалась задача по кинетике напряжений и деформаций [5, 6]. В основу положен метод последовательного прослеживания во времени с шагом Δt и метод конечных элементов по пространству, т. е. рассматриваемая область представлялась совокупностью элементарных объемов размерами $h_x \times h_y \times h_z$. Размер единичного элемента в модели составляет $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ мм.

Для оценки закономерностей распределения температур в шве и зоне термического влияния сварных соединений расчетным методом использовали температурные зависимости изменения теплоемкости и теплопроводности исследуемого материала. Эти значения для сплава Inconel 690 были выбраны по данным литературных источников, а также с учетом собственных исследований [1, 7].

Эффективный КПД дуги η , применяемый в расчетах, для процесса сварки неплавящимся электродом в среде защитных газов составляет $0,50 \dots 0,75$. Были рассчитаны температурные поля при значениях этого коэффициента, равных 0,5,

Температурная зависимость теплофизических свойств сплава Inconel 690

Температура, °C	Модуль Юнга, МПа	Предел текучести, МПа	Коэффициент термического расширения, 1/град	Теплопроводность, Вт/см·град	Теплоемкость, Дж/г·град
20	205000	348	0,00001406	0,115	0,453
100	204000	281	0,00001406	0,130	0,474
200	193000	248	0,00001431	0,155	0,496
300	187000	240	0,00001453	0,173	0,523
400	185000	231	0,00001480	0,190	0,557
500	177000	225	0,00001519	0,212	0,574
600	167000	215	0,00001570	0,227	0,608
700	158000	200	0,00001618	0,250	0,633
800	152000	190	0,00001660	0,269	0,660
900	145000	175	0,00001701	0,285	0,690
1000	135000	150	0,00001741	0,303	0,715
1100	125000	125	0,00001779	0,318	0,739
1200	100000	100	0,00001800	0,332	0,769

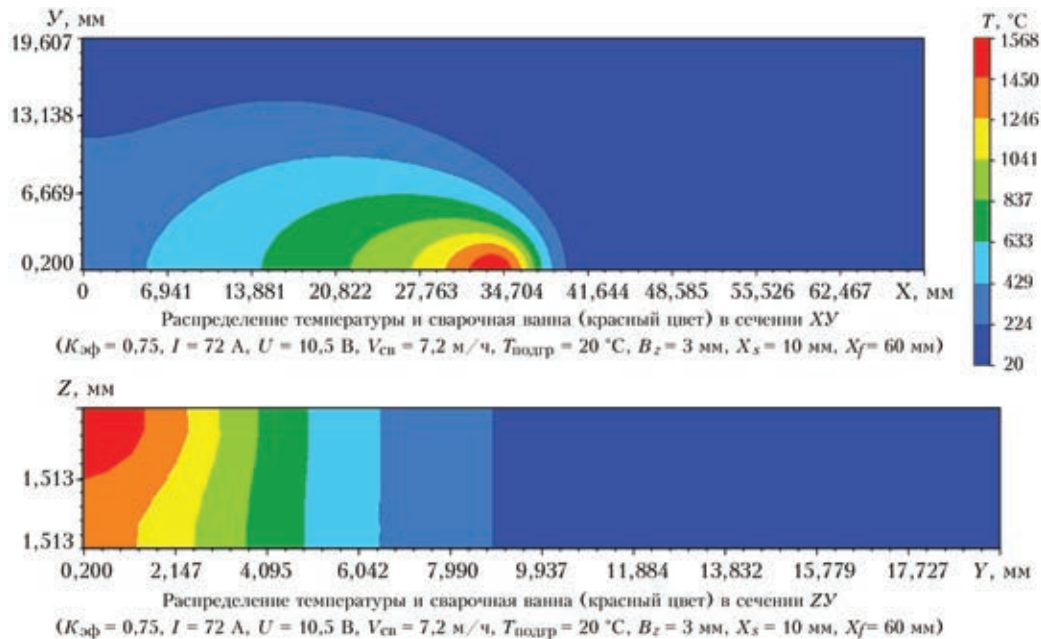


Рис. 3. Распределение температурных полей в плоскости XY и по толщине пластины

0,60, и 0,70. На рис. 2 показано, что существует значительное влияние коэффициента полезного действия дуги как на распределение тепла, так и на формы изотерм. При моделировании было выбрано значение $\eta = 0,70 \dots 0,75$, поскольку соответствующее температурное поле хорошо совпадает с экспериментальными результатами.

Первым этапом моделирования было определение температурных полей с учетом зависимых от температуры свойств материала (теплоемкости, теплопроводности) и потерь температуры вследствие конвекции и излучения.

Температуры плавления и кристаллизации были приняты 1377 и 1343 °C соответственно [1].

На рис. 3 приведены результаты расчета распределения температуры по поверхности движения источника при установившемся состоянии в области сварочной ванны и ЗТВ. В силу симметрии решаемой задачи на рисунке показана половина пластины.

Была проведена верификация рассчитанных температурных полей с измеренными с помощью термопар термическими циклами и реальными размерами сварного шва. Сравнение данных показало хорошую сходность результатов как по размерам шва (ширина шва и глубина проплавления в эксперименте составляли 4,2 и 1,3 мм соответственно, при моделировании — 4,1 и 1,4 мм), так и по термическим циклам в точках на различном удалении от линии сплавления. Таким образом, подтверждена правомерность использования исходных теплофизических характеристик для расчета распределения температур в сварном соединении при сварке сплавов системы легирования Ni–Cr–Fe.

Моделирование напряженно-деформированного состояния осуществляли с учетом температурной зависимости физико-механических свойств сплава, в том числе модуля упругости, предела текучести и коэффициента термического расширения. Все эти характеристики определялись экспериментально в интервале температур до 1100 °C. Предел текучести и модуль упругости определялся на установке MTS-810, оценку коэффициента линейного расширения выполняли на бесконтактном лазерном dilatометре. Данные по теплофизическим и механическим свойствам представлены в таблице.

С учетом рассчитанных температурных полей выполнялось моделирование напряженно-деформированного состояния при сварке. Получены распределения временных и остаточных напряжений и деформаций для различных зон сварного соединения.

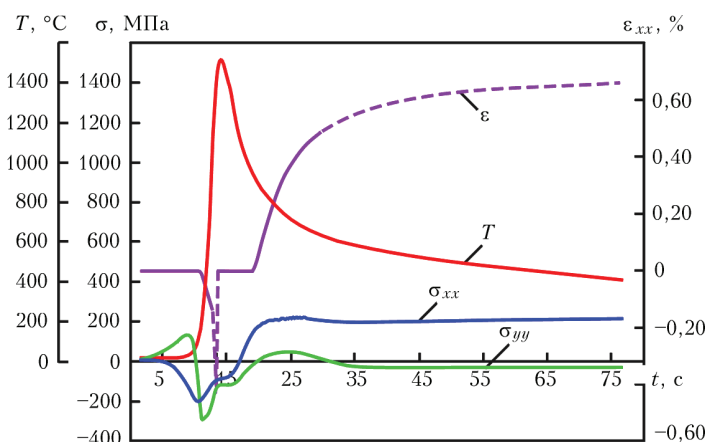


Рис. 4. Кинетика изменения температуры T , продольных σ_{xx} и поперечных σ_{yy} напряжений и продольных пластических деформаций ε_{xx} вдоль оси шва при сварке

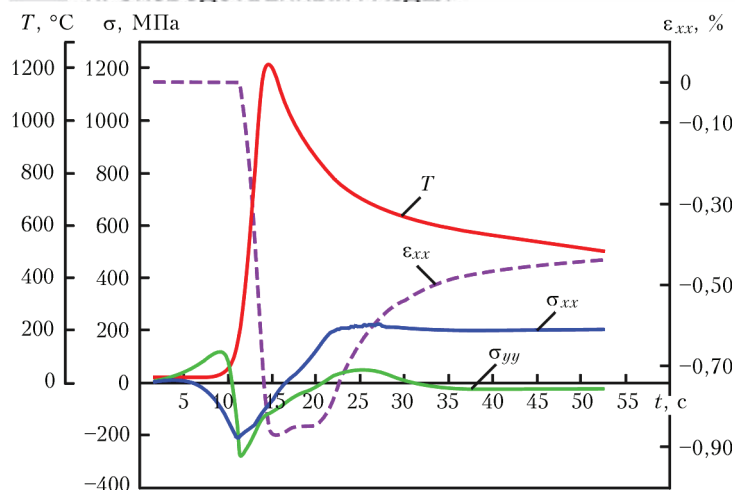


Рис. 5. Кинетика изменения температуры T , продольных σ_{xx} и поперечных σ_{yy} напряжений и продольных пластических деформаций ϵ_{xx} в ЗТВ на расстоянии 0,5 мм от линии сплавления при сварке

Исследования свариваемости сплавов системы легирования Ni–Cr–Fe показали [4], что образование трещин возможно как в шве, так и в зоне термического влияния на расстоянии 0,5...3 мм от линии сплавления. В связи с этим рассмотрена кинетика изменения термонапряженного состояния в шве и зоне термического влияния на расстоянии 0,5 мм от линии сплавления (рис. 4, 5).

С началом цикла нагрева металл подвергается сжимающим продольным σ_{xx} и поперечным σ_{yy} напряжениям. Продольные пластические деформации ϵ_{xx} также сжимающие, их величина достигает значений 0,9 %. При последующем охлаждении возникают напряжения растяжения как продольные, так и поперечные. При этом продольные напряжения достигают значений 215 МПа и значительно превышают поперечные, которые равны 40 МПа. Продольные напряжения достигают максимальных значений при охлаждении до температуры 650 °С. По мере дальнейшего охлаждения продольные напряжения остаются на постоянном уровне, а поперечные постепенно снижаются. Продольные пластические деформации при охлаждении имеют положительные приращения до 0,5 %.

На основании этих результатов можно заключить, что для данных условий моделирования однопроходной сварки максимальные приращения пластической деформации совпадают с диапазоном температурного интервала хрупкости сплава и развиваются одновременно с ростом продольных растягивающих напряжений, но являются

недостаточными для образования трещин провала пластичности.

Выводы

1. Экспериментально-расчетным путем выполнена оценка температурных полей при однопроходной сварке никелевого сплава Inconel 690. Сравнение данных показало хорошую сходность результатов как по размерам шва, так и по термическим циклам в точках на различном удалении от линии сплавления, что подтверждает правомерность использования исходных теплофизических характеристик металла для расчета распределения температур в сварном соединении.

2. С учетом экспериментально определенных физико-механических свойств сплава выполнено математическое моделирование напряженно-деформированного состояния и рассмотрена кинетика изменения напряжений и деформаций для различных зон сварного соединения. Показано, что в условиях моделирования прямолинейной однопроходной сварки пластин толщиной 3 мм при погонной энергии 304 Дж/мм возникающие напряжения и деформации не превышают критических значений и не создаются условия для образования горячих трещин.

1. INCONEL® alloy 690 [Электронный ресурс]. – 2009. – 8 р. – Доступно по: URL: <http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20690.pdf>.
2. Kiser S.D., Zhang R., Baker B.A. A new welding material for improved resistance to ductility dip cracking // Proceedings of the 8th International Conference on Trends in Welding Research. – Pine-Mountain, GA, 2009. – P. 639–644.
3. Nishimoto K. Microcracking in multipass weld metal of alloy 690 Part I: Microcracking susceptibility in reheat weld metal // Science and Technology of Welding and Joining. – 2006. – 11(4). – P. 455–461.
4. Сравнительная оценка и исследование чувствительности к образованию горячих трещин в швах и сварных соединениях сплава Inconel 690 с использованием проволок Inconel®52 и Inconel®52MSS / К.А. Ющенко, В.С. Савченко, Н.О. Червяков и др. // Автомат. сварка. – 2011. – № 11. – С. 4–10.
5. Махненко В.И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. – Киев: Наук. думка, 1976. – 320 с.
6. Investigation of thermal-deformation state of welded joints in stable-austenitic steels and nickel alloys / K.A. Yushchenko, V.I. Makhnenko, V.S. Savchenko et al. // Welding in the world. – 2007. – 51. – № 9/10. – P. 51–55.
7. Физико-механические характеристики швов типа In690 в высокотемпературном интервале провала пластичности / К.А. Ющенко, В.С. Савченко, А.В. Звягинцева и др. // Материалы 55-й международной конференции «Актуальные проблемы прочности». – Харьков, 2014. – С. 189.

Поступила в редакцию 28.09.2015

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ БИМЕТАЛЛА, ПОЛУЧЕННОГО АУТОНОМНОЙ ВАКУУМНОЙ НАПАЙКОЙ МЕДИ НА СТАЛЬ

М.Г. АТРОШЕНКО, М.А. ПОЛЕЩУК, А.В. ШЕВЦОВ, А.Л. ПУЗРИН, Д.Д. МИЩЕНКО,
И.П. СЕРЕБРЯНИК, А.И. БОРОДИН

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

Определены физико-механические свойства зоны соединения биметалла, полученного автономной вакуумной напайкой меди М1 на стальные заготовки. При испытании на растяжение разрушение стандартных образцов всегда происходило в медной части. При этом прочностные свойства медного напаянного слоя в исходном состоянии превышали справочные значения для деформированной и отожженной меди М1. Предел прочности на отрыв напаянного медного слоя, определенный на специальных образцах, равен временному сопротивлению на разрыв стали 20. Исследования физических характеристик зоны соединения показали, что при технических расчетах дополнительным электрическим и термическим сопротивлениями зоны контакта можно пренебречь. Библиогр. 13, табл. 1, рис. 7.

Ключевые слова: автономная вакуумная напайка; биметалл сталь–медь; механические свойства зоны соединения; электро- и теплосоппротивления контакта

При производстве отдельных узлов машин и агрегатов в некоторых случаях используют заранее изготовленные биметаллические медно-стальные заготовки. Применение таких заготовок позволяет получать детали, надежно работающие при высоких электрических, тепловых и механических нагрузках. При их работе важное значение имеют физико-механические свойства металла в зоне соединения меди со сталью. Переходная зона сталь–медь должна обладать минимальными электрическим и тепловым сопротивлениями и иметь достаточно высокую механическую прочность.

Очевидно, что конкретные значения этих величин зависят от способа изготовления медно-стальной заготовки.

Биметаллические полосы толщиной до 4,0 мм, используемые для производства силового электротехнического оборудования, изготавливают, в основном, совместной прокаткой стальных и медных полос или многослойных пакетов [1, 2]. Заготовки других форм с большим поперечным сечением можно производить диффузионной сваркой в вакууме [3], сваркой взрывом [4], сваркой трением с перемешиванием [5], а также высокотемпературной пайкой [6]. Для изготовления крупногабаритных заготовок, таких как водоохлаждаемые подовые электроды дуговых сталеплавильных печей постоянного тока, подшипников скольжения больших диаметров и т. д., применяют различные виды сварки плавлением [7], в том числе электрошлаковую [8], используют заливку расплавленной меди на нагретую до 900 °С сталь [9].

В последнее время разработан способ получения крупногабаритных медно-стальных заготовок путем плавления меди в автономном вакууме. Способ основан на использовании автовакуумного эффекта, который заключается в самопроизвольной очистке от оксидных пленок поверхностей стальных заготовок при их нагреве до температуры более 1000 °С в условиях замкнутого объема. В этом случае кислород, находящийся в составе оксидной пленки, диффундирует вглубь стальной заготовки. Одновременно происходит окисление ее поверхности кислородом из замкнутого объема. Процесс диффузии продолжается до тех пор, пока не израсходуется весь кислород замкнутого объема и не исчезнет оксидная пленка. Время удаления оксидной пленки с поверхности стальной заготовки может быть сокращено путем предварительной откачки воздуха из замкнутого объема [10].

Для изготовления биметаллического изделия на стальной части заготовки, будущей поверхности раздела биметалла, создают замкнутый объем. В него помещают медь в количестве, необходимом для получения медной части заготовки. После герметизации объема с медью сборку нагревают до температуры 1130...1150 °С. При такой температуре происходит очистка стальной поверхности от оксидной пленки, что приводит после расплавления меди к образованию прочной металлургической связи со сталью [11].

Целью настоящей работы является определение физико-механических характеристик переходной зоны сталь–медь, полученной плав-

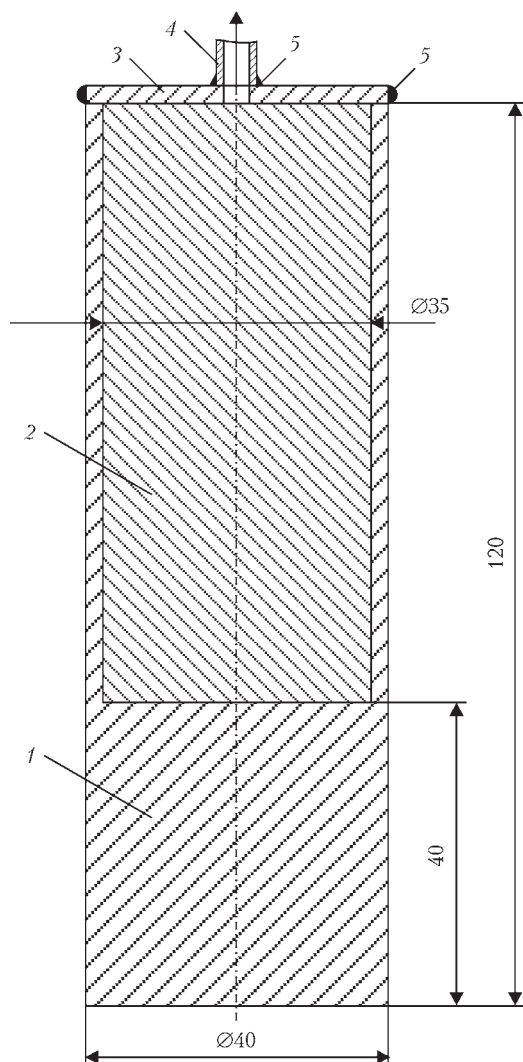


Рис. 1. Эскиз опытной заготовки для пайки: 1 — полый цилиндр; 2 — расплавляемый компонент (медь); 3 — крышка; 4 — патрубок для вакуумирования; 5 — герметизирующие сварные швы

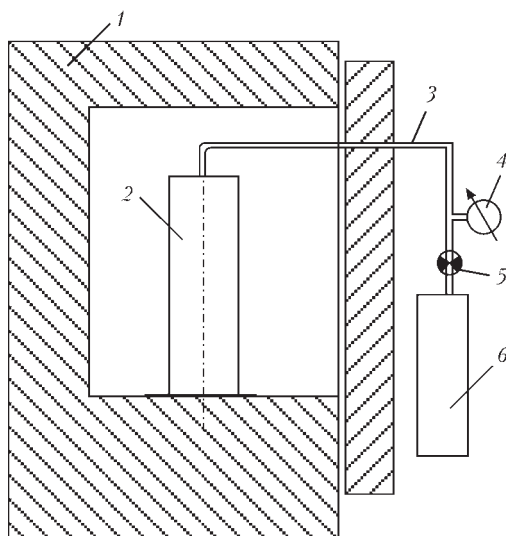


Рис. 2. Схема проведения автономной вакуумной напайки: 1 — термическая печь; 2 — опытная заготовка; 3 — вакуумпровод; 4 — мановакуумметр; 5 — вентиль; 6 — форвакуумный насос

лением меди в автономном вакууме, а именно электрического и теплового сопротивления, механической прочности на растяжение и отрыв.

Для проведения исследований изготавливали полые цилиндры с массивным дном из стали 20. Полости цилиндров плотно заполняли обрезью медного листа М1 толщиной 2,5 мм. Отверстие полости закрывали стальной крышкой, в центр которой вваривали тонкостенную стальную трубку. Крышку герметизировали аргонодуговой сваркой (рис. 1).

Подготовленные к опыту цилиндры размещали в термической печи с обычной атмосферой. Патрубок-вакуумпровод выводили наружу и подключали к форвакуумному насосу через вентиль с мановакуумметром (рис. 2).

Перед нагревом внутри цилиндров форвакуумным насосом создавали разрежение и перекрывали вентиль. Термическую печь нагревали до температуры 1150 °С и после 30 минутной изотермической выдержки отключали и открывали дверцу. Цилиндры до полного охлаждения оставляли внутри печи. Во время нагрева разрежение внутри цилиндров по показаниям мановакуумметра практически не менялось.

После охлаждения каждый цилиндр разрезали вдоль образующей на четыре равные части, из которых изготавливали образцы для механических испытаний, измерения электросопротивления и изучения микроструктуры переходной зоны.

На рис. 3 приведена фотография макрошлифа продольного темплета цилиндрической медно-стальной заготовки. Визуальный осмотр макрошлифа с применением лупы десятикратного увеличения не выявил дефектов, нарушающих сплошность металла в напаянной меди и в зоне соединения ее со сталью.

Для проведения механических испытаний на растяжение изготавливались образцы диаметром

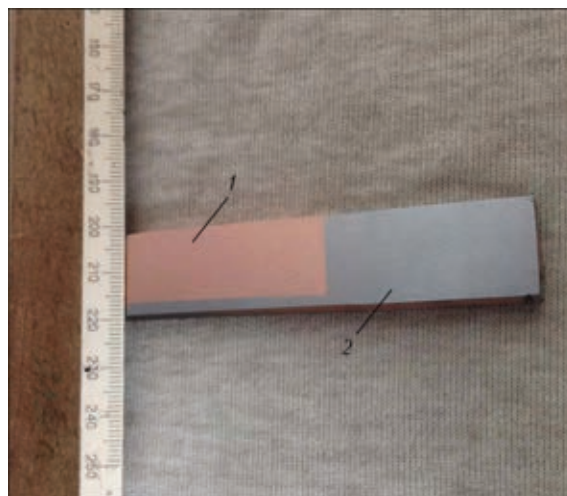


Рис. 3. Макрошлиф сталемедного биметаллического соединения: 1 — медь; 2 — сталь



Рис. 4. Образцы после испытаний на растяжение

разрывной части 6,0 и длиной 40 мм. Сталемедный контакт располагался на середине разрывной части. При испытаниях разрушение всех образцов происходило по медной части (рис. 4). Это означает, что прочность контакта медь–сталь выше, чем прочность меди на растяжение.

Результаты испытаний приведены в таблице.

Приведенные данные свидетельствуют, что значения механических свойств испытанных образцов выше, чем у деформированной и отожженной меди по справочным данным [12].

Основной характеристикой качества биметаллического соединения является прочность на отрыв напаянного слоя. Для получения достоверных данных о прочности на отрыв следует испытывать образцы специального вида, которые имеют кольцевую проточку на более прочном элементе соединения (рис. 5).

Такая проточка уменьшает площадь контакта меди со сталью, одновременно сохраняя неизменным диаметр медной части образца [13]. Испытания показали, что разрушение произошло по линии соединения. При этом среднее значение предела прочности на отрыв составило 480 МПа, что соответствует значению временного сопротивления разрыву у отожженной стали 20 [12].

Таким образом, приведенные выше результаты механических испытаний свидетельствуют о том, что метод автономной вакуумной напайки позво-

Механические свойства сталемедных образцов в сравнении со свойствами меди

№ образца	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное сужение, %
1	110,3	282,5	70,0
2	113,5	281,0	73,1
3	127,4	282,8	73,1
Среднее	117,06	282,7	72,06
Медь, деформированная и отожженная [12]	74,0	216,0	75,0

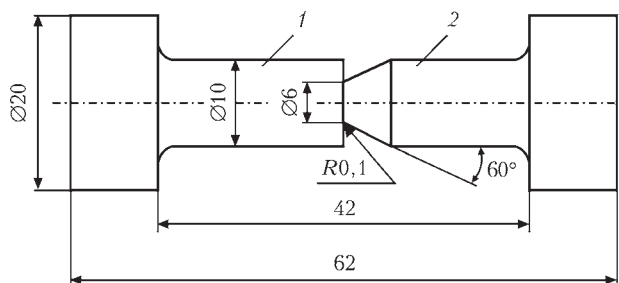


Рис. 5. Эскиз образца для испытаний на статический отрыв: 1 — медная часть; 2 — стальная часть

ляет получить сталемедный биметалл с высокой прочностью соединения слоев.

Другими важными характеристиками, которые обеспечивают надежную работу биметалла при высоких электрических и тепловых нагрузках, являются величины электрического и теплового сопротивления в районе контакта сталь–медь. Чем меньше эти сопротивления, тем лучше теплоотвод через границу раздела и ниже электрические потери при прохождении тока через нее. В переходной области происходит изменение коэффициентов электро- и теплопроводности от значений, присущих стали, до таковых у меди. При отсутствии в ней большого количества пор, трещин и др. дефектов, нарушающих плотность металла, эти изменения происходят плавно. Поэтому в переходной зоне величина этих коэффициентов может быть принята как среднее значение между коэффициентами медной и стальной частей. При таком допущении полное электрическое и тепловое сопротивление переходной зоны определяются только ее шириной. Переходная зона сталь–медь биметаллических соединений, полученных различными способами сварки и плавнения, определяется как область распространения твердых растворов меди в стали и стали в меди по обе стороны границы раздела. Эти твердые растворы менее электро- и теплопроводны чем чистая медь [7]. Таким образом, измеряя электро- или теплопроводность биметаллического образца в направлении, перпендикулярном линии соединения, можно экспериментально определить ширину переходной зоны.

В металлических проводниках существует прямая связь между электро- и теплосоппротивлением, определяемая законом Видемана-Франца в его современной интерпретации. Таким образом, зная одну из этих величин всегда можно определить другую. Методически значительно проще измерять электросопротивление. Поэтому мы провели его оценку, используя методику, предложенную в работе [7].

Из цилиндров изготовили образцы размером 4×4×40 мм таким образом, чтобы граница раздела сталь–медь находилась посередине.

Измерения проводились методом «амперметра-вольтметра» в дифференциальном варианте

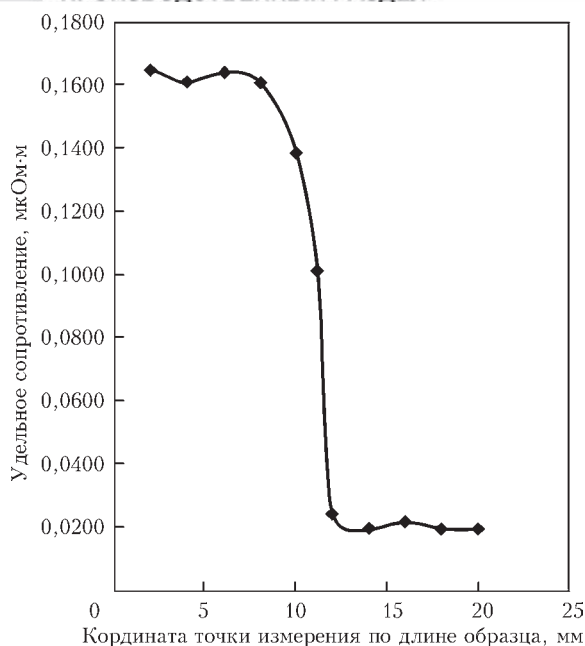


Рис. 6. График изменения электрического сопротивления переходной зоны биметалла сталь-медь, полученного автономной вакуумной напайкой

путем перемещения потенциометрической вилки с распадом электродов 2,3 мм шагом 1 мм от стальной части к медной перпендикулярно линии сплавления. Результаты измерения показаны на рис. 6.

График, приведенный на этом рисунке, показывает, что изменение электросопротивления на границе раздела сталь-медь сосредоточено на отрезке около 4,0 мм. Однако размер этого отрезка не может быть отождествлен с шириной переходной зоны нашего соединения. На самом деле она значительно меньше. Об этом свидетельствует характер кривой изменения электросопротивления в районе границы раздела сталь-медь.

Действительно, судя по графику, первоначальное изменение сопротивления происходит плавно от стали к меди на протяжении более 2,0 мм, а затем резко снижается вплоть до значения, присущего меди. Такой вид кривой свидетельствует о том, что ширина переходной зоны меньше, чем расстояние между электродами потенциометрической вилки. Следовательно, разрешающая способность метода, предложенного в работе [7], не позволяет оценить ширину тонких переходных зон, а только определить среднее значение электросопротивления в ней.

Выявить размеры переходной зоны можно металлографическим методом путем исследования микрошлифов. На рис. 7 представлена микроструктура биметаллического соединения, полученного методом автономной вакуумной напайки меди на стальную поверхность.

В результате взаимодействия расплава меди М1 со сталью 20 при увеличении 100 наблюдает-

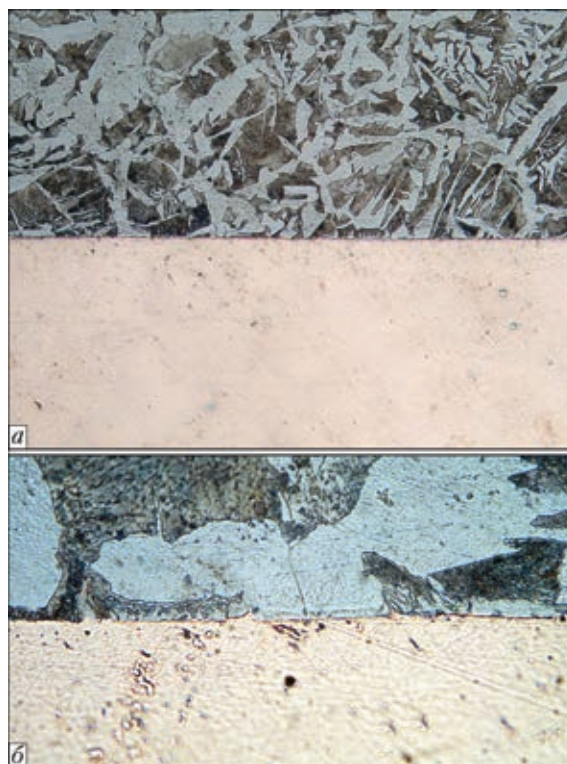


Рис. 7. Микроструктура биметаллического соединения, полученного автономной вакуумной напайкой меди на сталь: а — $\times 100$; б — $\times 1000$

ся линия сплавления повышенной травимости. При увеличении 1000 видна начальная стадия проникновения меди в сталь. Структура стали (феррит + перлит) вблизи линии сплавления существенно не отличается от остального массива. По всему объему напаянной меди имеют место мелкие неметаллические включения, концентрация которых увеличивается у границы раздела на расстоянии 40...50 мкм.

Микротвердость измеряли при нагрузке 50 грамм в направлении, перпендикулярном линии сплавления. Со стороны стали было отмечено резкое увеличение микротвердости. Так, в основном массиве стали микротвердость составляет около 1880 МПа. На расстояния 10...15 мкм от линии сплавления и до нее микротвердость достигает 3000 МПа. Со стороны меди резких изменений микротвердости не наблюдается. По всему сечению напаянной меди она составляет 920...1080 МПа.

Таким образом, при изучении микроструктуры биметаллического соединения по обе стороны границы раздела были выявлены две аномальные области в которых может происходить изменение коэффициентов электро- и теплопроводности. Со стороны стали это область повышенной микротвердости, а со стороны меди — область высокой концентрации неметаллических включений.

Суммарная протяженность этих областей не превышает 70 мкм. Поэтому размер этого участ-

ка можно отождествлять с шириной переходной зоны от стали к меди.

Эта ширина, как минимум, на три порядка меньше ширины каждой составляющей сталемедного биметалла. Следовательно, общие дополнительные электрическое и термическое сопротивления переходной зоны, определяемые как произведение средних значений удельных сопротивлений в ней на ее ширину, будут на те же три порядка меньше сопротивлений каждой части биметаллического контакта. Поэтому при инженерных электрических и тепловых расчетах биметаллического сталемедного соединения, полученного автономной вакуумной напайкой, этими дополнительными сопротивлениями можно пренебречь.

Выводы

1. Контакт между сталью и медью в биметаллических соединениях, полученных автономной вакуумной напайкой меди, при электрических и тепловых расчетах можно считать идеальным.

2. При испытании на растяжение разрушение стандартных биметаллических образцов происходит по меди. При этом прочностные свойства медного напаянного слоя превышают справочные значения для деформированной и отожженной меди М1.

3. Предел прочности на отрыв напаянного медного слоя, определенный на специальных образцах, соответствует временному сопротивлению на разрыв стали 20.

4. Технология автономной вакуумной напайки может быть использована для получения биме-

талла, состоящего из углеродистых сталей и меди других марок.

1. Пат. 52-123824 Япония, МКИ 12А 220 С 23 с 1/00. Одностороннее плакирование стального листа / М. Кунихару и др.; Заяв. 15.10.77; Оpubл. 8.05.79, № 54-56940.
2. Буков А.А. Коррозионностойкий биметаллический листовой прокат // Сталь. – 1979. – № 6. – С. 446–450.
3. Николаев Г.А., Ольшанский И.А. Специальные методы сварки. – М.: Машиностроение, 1975. – 232 с.
4. Кудинов В.М., Коротеев А.Я. Сварка взрывом в металлургии / Под ред. Э.С. Каракозова. – М.: Металлургия, 1978. – 168 с.
5. Технология восстановительного ремонта слябовых кристаллизаторов МНЛЗ наплавкой трением с перемешиванием / Ю.А. Никитюк, Г.М. Григоренко, В.И. Зеленкин и др. // Современ. электрометаллургия. – 2013. – № 3. – С. 51–55.
6. Патон Б.Е., Россоминский А.А. Некоторые вопросы развития технологии пайки // Современные методы пайки. – Киев, 1982. – С. 3–12.
7. Сварное соединение меди со сталью в подовом электроде дуговой сталеплавильной печи постоянного тока / В.И. Лакомский, А.Г. Богаченко, Д.Д. Мищенко и др. // Современ. электрометаллургия. – 2013. – № 4. – С. 7–9.
8. Электрошлаковая технология в производстве биметаллических заготовок / Б.Е. Патон, В.Я. Саенко, Л.Б. Медовар и др. // Там же. – 2004. – № 2. – С. 8–11.
9. Голованенко С.А., Меандров Л.В. Производство биметаллов. – М.: Металлургия, 1966. – 256 с.
10. Пузрин Л.Г., Бойко Г.А., Атрошенко М.Г. Автовакуумная высокотемпературная пайка. – Киев: Об-во «Знание» УССР, 1975. – 18 с.
11. А.с. № 1235075 СССР. Способ изготовления охлаждаемых панелей / И.П. Серебряник, Ю.М. Буравлев, Н.П. Иваницын и др.; Заяв. 28.06.1984.
12. Келогду Ю.П., Захариевич К.М., Карташевская М.А. Металлы и сплавы: Справочник. – Кишинев, 1977. – 264 с.
13. Метод определения сопротивления отрыву плакирующего слоя биметаллов / В.Г. Овсянников, В.И. Шейко, В.А. Малышев, Л.Г. Илюхина // Зав. лаборатория. – 1976. – № 3. – С. 339–340.

Поступила в редакцию 30.07.2015



Ассоциация «Электрод»

ООО Промышленная
компания «ХОБЭКС электрод»



IX Международная конференция «Дуговая сварка. Материалы и качество»

Посвящается 50-летию Первой всесоюзной конференции
по сварочным материалам (1966 г.)
и 25-летию создания ассоциации «Электрод» (1990 г.).

31 мая – 3 июня 2016 г.

г. Волгоград

Тематика конференции

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

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

Информационная поддержка: журнал «Автоматическая сварка».



ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ, ВЫЗВАННОГО НАГРЕВОМ КОЛЬЦЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ, ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ

А.В. МОЛТАСОВ, К.В. ГУЩИН, И.Н. КЛОЧКОВ, П.Н. ТКАЧ, А.И. ТАРАСЕНКО

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

При контактной стыковой сварке изделий замкнутой формы усилие, которое должна обеспечить сварочная машина для качественного формирования сварного соединения в твердой фазе, определяется не только усилием осадки, но и усилием, затрачиваемым на изгиб самой детали, а также усилием, вызванным нагревом шунтирующей части. Поэтому при выборе оборудования для сварки того или иного изделия замкнутой формы необходимо определить суммарное усилие, которое должна обеспечить сварочная машина. Проведены экспериментальные измерения температуры в различных характерных точках на конечной стадии процесса выполнения контактной стыковой сварки кольца из материала сталь 20 на машине К-724. Было установлено, что температура в шунтирующей части изменяется как по окружной, так и по радиальной координате. Поскольку определение силовых параметров контактной стыковой сварки основано на решении соответствующих задач теории упругости, необходимо задать температуру в виде непрерывной функции координат. При решении этих задач в полярных или цилиндрических координатах наиболее удобной для описания изменения температуры является четная часть ряда Фурье по окружной координате. Существующая методика описания температурного поля была усовершенствована таким образом, что при определении коэффициентов Фурье использовались не только экспериментальные данные, но и данные, полученные путем компьютерного моделирования. Это позволило использовать для описания температурного поля неограниченное количество членов аппроксимирующего ряда. На основании постулатов предложенной модели была получена функция общего вида, которая позволяет определить температуру в любой точке шунтирующей части при использовании неограниченного количества членов аппроксимирующего ряда. Приведено выражение для определения усилия, вызванного нагревом шунтирующей части. Проведен расчет силовых параметров контактной стыковой сварки пульсирующим оплавлением исследуемого кольца. В результате было установлено, что усилие, вызванное нагревом шунтирующей части, составило 9,1 % суммарного усилия, необходимого для качественного формирования соединения. Величина температурного усилия связана с величиной эквивалентного температурного перемещения. Расчетное значение этого перемещения, соответствующее предложенной модели, хорошо согласуется с результатами численного моделирования температурных перемещений в свариваемой заготовке. Библиогр. 11, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка, кольцевые изделия, токи шунтирования, температурное поле, ряды Фурье, температурное усилие

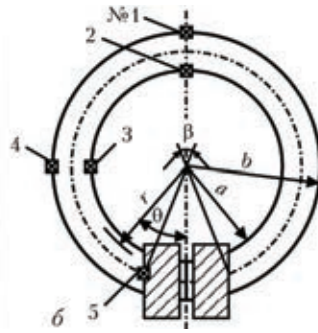
Преимущества контактной стыковой сварки (КСС) обуславливают ее широкое применение в сварочном производстве при изготовлении таких элементов конструкций, как шпангоуты, бандажи, поворотные круги, кольца жесткости, ободья колес и другие изделия замкнутой формы [1].

В ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины был разработан ряд машин для КСС кольцевых изделий, которые способны развивать усилие от нескольких десятков до нескольких тысяч килоньютонів [2], при этом некоторые из них также имеют ограничения по минимальному внутреннему диаметру свариваемого изделия [3]. Поэтому перед производителем часто стоит сложная задача по выбору оптимального оборудования из существующего ряда машин для сварки того или иного кольцевого изделия.

При КСС деталей незамкнутой формы силовые параметры определяются удельным давлением осадки материала детали и площадью ее поперечного сечения [4]. В процессе КСС кольцевых из-

делий происходит изгиб самой детали и шунтирование электрического тока через нее [5].

В работе [6] было доказано, что нагрев шунтирующей части способствует возникновению температурных напряжений, которые оказывают влияние на величину усилия, необходимого для формирования качественного сварного соединения при КСС. Однако методика описания температурного поля, продемонстрированная в данной работе, дает возможность использовать ограниченное количество членов ряда, при помощи которых не всегда возможно получить желаемую точность. Кроме того, не было приведено выражение для усилия, которое создают температурные напряжения в шунтирующей части. Поэтому целью настоящей работы является усовершенствование методики описания температурного поля и определение усилия, вызванного нагревом шунтирующей части. Экспериментальные измерения температур проводились при КСС кольца из стали



Номер точки	θ , рад	T , °C
1	π	460
2	π	510
3	$\pi/2$	480
4	$\pi/2$	450
5	$\approx \pi/6$	130

Рис. 1. Заготовка кольца в зажимных устройствах сварочной машины К-724 (а) и схема расположения точек (1–5) контроля температур (б)

20 сечением $55 \times 25 \text{ мм}^2$ и внутренним диаметром 270 мм (рис. 1, а) в пяти контролируемых точках (рис. 1, б).

По результатам измерений установлено, что температура в шунтирующей части изменяется как по окружной θ , так и по радиальной r координате. Поскольку определение усилия, вызванного нагревом шунтирующей части, основано на решении соответствующих задач теории упругости, необходимо задать температуру в виде непрерывной функции координат. При решении задач в полярных координатах наиболее удобной для описания изменения температуры является четная часть ряда Фурье по окружной координате θ

$$T(\theta) = A_0 + \sum_1^n A_n \cdot \cos n\theta. \quad (1)$$

Для определения неизвестных коэффициентов Фурье A_n необходимо составить систему уравнений для значений температур в различных по окружной координате θ точках шунтирующей части. Поскольку экспериментальные данные дают возможность установить только по три значения температур на внешнем и внутреннем диаметре, а именно $T(\pi/6)$, $T(\pi/2)$ и $T(\pi)$, то остальные можно определить путем компьютерного моделирова-

ния температурного поля (рис. 2, а). Количество уравнений системы определяет точность описания температурного поля. Использование первых шести членов ряда (таблица) дает возможность описать температурное поле с точностью до 3°C . Можно убедиться, что значения температур, взятые из графика (рис. 2, б), совпадают с результатами компьютерного моделирования.

Как видно (таблица), значение коэффициентов убывает по абсолютной величине, поэтому введение последующих коэффициентов не внесет весомой поправки в величины температур.

Изменение температур в радиальном направлении определяется из дифференциального уравнения теплопроводности [7]

$$\frac{1}{\chi} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2}, \quad (2)$$

где χ — коэффициент температуропроводности.

Поскольку рассматривается температурное поле в момент, когда температуры достигают своего максимального значения, а не его изменение во времени, то левая часть уравнения (2) обращается в нуль, решение такого уравнения приведено в работе [6].

В результате была получена соответствующая предложенной модели функция общего вида, ко-

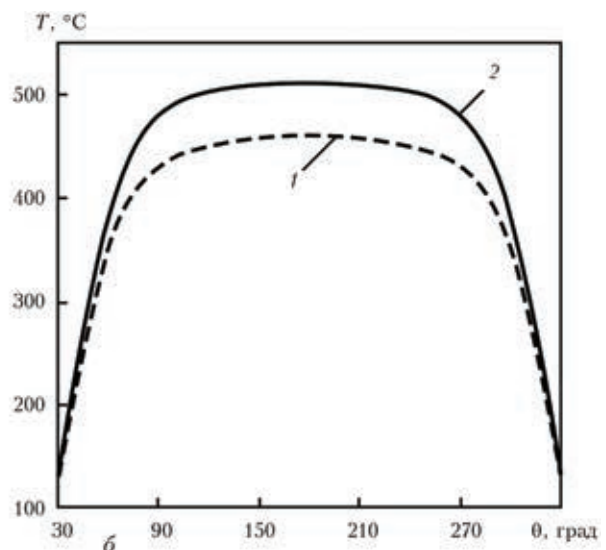
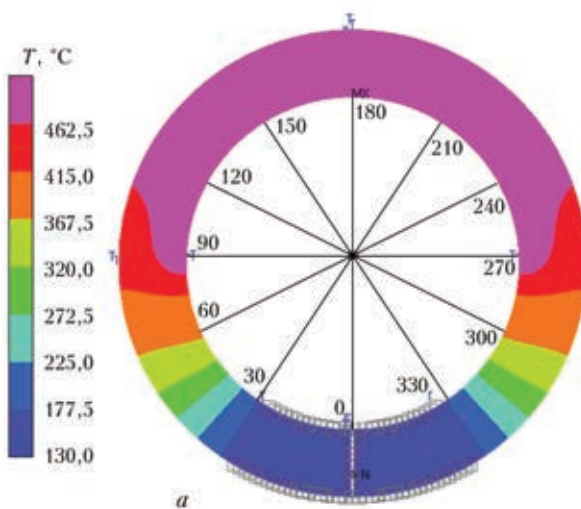


Рис. 2. Поля температур в кольце (а) и графики распределения температур по внешнему (кривая 1) и внутреннему (2) диаметру (б)



Расчетные коэффициенты Фурье в точках 1–5

Коэффициент	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
$T_{\text{внут. диам.}}^{\circ\text{C}}$	373	-221	-122,5	-51	-15	-3
$T_{\text{внеш. диам.}}^{\circ\text{C}}$	339	-192	-106,5	-48	-15	-3

торая позволяет определить температуру в любой точке шунтирующей части

$$T(r, \theta) = K_0 + H_0 \ln r + \sum_{n=1}^n \left(K_n r^n + \frac{H_n}{r^n} \right) \cos n\theta, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} K_0 &= \frac{A_0(a) \ln b - A_0(b) \ln a}{\ln b - \ln a}; \\ K_n &= \frac{A_n(b) \cdot b^n - A_n(a) \cdot a^n}{b^{2n} - a^{2n}}; \\ H_0 &= \frac{A_0(b) - A_0(a)}{\ln b - \ln a}; \\ H_n &= \frac{a^n b^n}{b^{2n} - a^{2n}} [A_n(a) \cdot b^n - A_n(b) \cdot a^n]. \end{aligned} \quad (4)$$

Методика определения напряжений, вызванных наличием температурного поля, которое описывается рядом Фурье, подробно изложена в работах [8, 9], компоненты напряжения имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma_r &= B_0 \frac{1}{r^2} + 2C_0 + D_0(1 + 2 \ln r) + \\ &+ \left(2B_1 r - \frac{2C_1}{r^3} + \frac{D_1}{r} \right) \cos \theta; \\ \sigma_\theta &= -B_0 \frac{1}{r^2} + 2C_0 + D_0(3 + 2 \ln r) + \\ &+ \left(6B_1 r + \frac{2C_1}{r^3} + \frac{D_1}{r} \right) \cos \theta; \\ \tau_{r\theta} &= \left(2B_1 r - \frac{2C_1}{r^3} + \frac{D_1}{r} \right) \sin \theta, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} B_0 &= -\frac{\alpha E H_0}{2(b^2 - a^2)} a^2 b^2 \ln \frac{b}{a}; \\ B_1 &= \frac{\alpha E H_1}{4(a^2 + b^2)}; \\ C_0 &= \frac{\alpha E H_0}{4} \frac{b^2 \ln b - a^2 \ln a}{b^2 - a^2} + \frac{\alpha E H_0}{8}; \\ C_1 &= -\frac{\alpha E H_1}{4(a^2 + b^2)} a^2 b^2; \\ D_0 &= -\frac{\alpha E H_0}{4}; \quad D_1 = -\frac{\alpha E H_1}{2}, \end{aligned}$$

где α — коэффициент линейного расширения; E — модуль упругости материала.

Связь компонентов перемещения с компонентами напряжения была установлена в работе [10].

Таким образом, напряжения (5) в сплошном кольце эквивалентны окружному перемещению подвижной кромки кольца с зазором на величину

$$\delta_T = -(2\pi - \beta) \alpha \left(H_0 \frac{a+b}{2} + H_1 \right). \quad (6)$$

Поскольку в нашем случае, согласно (4), H_0 и H_1 отрицательны, то перемещение δ_T направлено в сторону возрастания координаты θ , т.е. равносильно увеличению зазора.

В нашем случае температурное перемещение составило 2,88 мм, для подтверждения этого результата было проведено численное моделирование полей перемещений в заготовке кольца при нагреве, аналогичном тому, который реализуется в шунтирующей части кольца при КСС (рис. 3).

По результатам численного моделирования было установлено, что температурное перемещение левой кромки составило 3,04 мм, что на 5,3 % превосходит величину, полученную аналитическим расчетом по формуле (6), соответствующей температурному полю (3).

Поскольку это перемещение направлено в противоположную сторону от того, которое совершает подвижное зажимное устройство сварочной машины, часть усилия расходуется на его преодоление. Связь между перемещением и соответствующим ему усилием была установлена в работе [10]. Таким образом, для предотвращения перемещения (6) необходимо приложить усилие

$$\begin{aligned} P_T &= -\alpha E t \frac{2\pi - \beta}{4\pi} \times \\ &\times \left(H_0 \frac{(b^2 - a^2)^2 - 4a^2 b^2}{2(a+b)(b^2 - a^2)} + H_1 \frac{a^2 - b^2 + (a^2 + b^2) \ln \frac{b}{a}}{a^2 + b^2} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Для исследуемого кольца был проведен расчет силовых параметров КСС пульсирующим оплавлением [11]. Усилие, затрачиваемое на изгиб де-

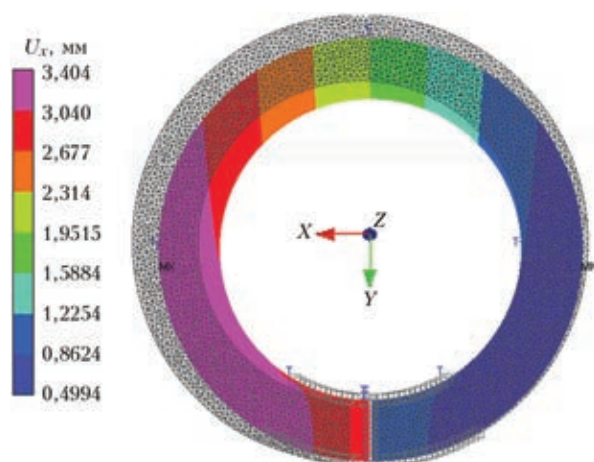


Рис. 3. Поле перемещений U в кольце (сеткой показано деформированное состояние)

тали, определяется по формуле, полученной в работе (10):

$$P_{изг} = -\frac{E\delta_{\Sigma}t}{4\pi(a^2+b^2)} \left[a^2 - b^2 + (a^2 + b^2) \ln \frac{b}{a} \right], \quad (8)$$

где δ_{Σ} — сумма начального зазора $\delta_{нз}$ и припусков на оплавление $\delta_{опл}$ и осадку $\delta_{ос}$.

В результате было установлено, что температурное усилие составляет более 9 % суммарного усилия, которое должна обеспечить сварочная машина для формирования качественного сварного соединения в твердой фазе.

Расчет силовых параметров КСС исследуемого кольца пульсирующим оплавлением проводили при следующих исходных данных: внутренний диаметр 270 мм, сечение $F = 55 \times 25 \text{ мм}^2$; удельное давление осадки $p_{ос}$ — 40 МПа; модуль упругости 210 ГПа; коэффициент линейного расширения $1,4 \cdot 10^{-5}$ 1/град; начальный зазор $\delta_{нз}$ — 2 мм; припуск на оплавление $\delta_{опл}$ — 9 мм; припуск на осадку $\delta_{ос}$ — 7 мм. Получили фиктивное смещение от нагрева δ_t — 2,88 мм; температурное усилие P_t — 14,8 кН; усилие осадки $P_{ос}$ — 55 кН; усилие изгиба $P_{изг}$ — 92,6 кН; суммарное усилие P_{Σ} — 162,4 кН; P_t/P_{Σ} — 9,1 %.

Выводы

1. Усовершенствована методика, которая позволяет, на основании дискретных данных, полученных путем экспериментальных измерений и компьютерного моделирования, описать температурное поле в шунтирующей части при контактной стыковой сварке кольцевой заготовки в виде четной части ряда Фурье по окружной координате.

2. В соответствии с постулатами предложенной модели была получена функция общего вида, которая позволяет определить температуру в любой

точке шунтирующей части свариваемого кольца при использовании неограниченного числа членов ряда.

3. Впервые получено аналитическое выражение для определения действующего на стык усилия, вызванного нагревом шунтирующей части. Для кольца из материала сталь 20 внутренним диаметром 270 мм и сечением $55 \times 25 \text{ мм}^2$ были рассчитаны силовые параметры КСС пульсирующим оплавлением. В результате было установлено, что усилие, вызванное нагревом шунтирующей части, составляет 9,1 % суммарного усилия, которое должна обеспечить сварочная машина.

1. Павличенко В.С. Контактная сварка изделий замкнутой формы. — М.: Машиностроение, 1964. — 114 с.
2. Кучук-Яценко С.И. Контактная стыковая сварка оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.
3. Контактная стыковая сварка изделий из высокопрочных сплавов на основе алюминия / С.И. Кучук-Яценко, П.Н. Червотко, Л.А. Семенов и др. // Автомат. сварка. — 2013. — № 7. — С. 3–7.
4. Гельман А.С. Технология контактной электросварки. — М.: Машгиз, 1952. — 324 с.
5. Кабанов Н.С. Сварка на контактных машинах. — М.: Высш. шк., 1973. — 255 с.
6. Влияние неравномерности нагрева на величину усилия осадки и время проковки при контактной стыковой сварке плоского кольца / А.В. Молтасов, С.М. Самоотрясов, В.В. Кныш и др. // Автомат. сварка. — 2014. — № 10. — С. 13–16.
7. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. — М.: Наука, 1964. — 488 с.
8. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости / Пер. с англ. — М.: Глав. ред. физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 1975. — 576 с.
9. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений / Под ред. Э.И. Григолюка. — М.: Мир, 1964. — 518 с.
10. Червотко П.Н., Молтасов А.В., Самоотрясов С.М. Расчет усилия осадки при контактной стыковой сварке изделий замкнутой формы // Автомат. сварка. — 2014. — № 1. — С. 50–53.
11. Пат. 46820 Украина. Способ контактной стыковой сварки / С.И. Кучук-Яценко, В.А. Дидковский, М.В. Богорский и др. — Оpubл. 17.06.2002.

Поступила в редакцию 11.02.2015

ЗАКАЖИТЕ ИНФОРМАЦИОННЫЙ БЮЛЛЕТЕНЬ!

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас подписаться на бесплатное получение информационного бюллетеня журнала «Автоматическая сварка».

Для подписки необходимо выслать по электронной почте письмо с темой «Информационный бюллетень/АС» на адрес редакции журнала: journal@paton.kiev.ua.



ВЛИЯНИЕ УСАДКИ МЕТАЛЛА ПРОДОЛЬНЫХ ШВОВ МУФТЫ НА КОНТАКТНОЕ ДАВЛЕНИЕ ПРИ РЕМОНТЕ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА

О.И. ОЛЕЙНИК

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

Эффективность ремонта магистрального газопровода в условиях эксплуатации во многом определяется контактным давлением, которое образуется при монтаже муфты на дефектный участок трубы. При правильном выборе величины контактного давления обеспечивается долговременная работоспособность отремонтированного участка через частичную разгрузку стенки трубы. Такой результат достигается за счет снижения давления в магистрали перед ремонтом и плотным обжатием муфты вокруг трубы специальными приспособлениями. Немаловажное значение оказывает и дуговая сварка усиливающих элементов муфты, в результате чего образуется контактное давление, вызванное усадкой многослойных продольных стыковых швов. В работе расчетным методом исследовано влияние толщины стенки муфты, диаметра трубопровода на величину контактного давления от усадки наплавленного металла. Показано, что наибольшее влияние на разгрузку стенки трубы с дефектом оказывает контактное давление от усадки металла при выполнении сварки на трубопроводах с наружным диаметром 1020 мм и менее. Дополнительное увеличение величины контактного давления от усадки металла можно достигнуть путем увеличения толщины стенки муфты. Для труб диаметром 1220 мм и более такой прием является неэффективным. Библиогр. 5, рис. 5.

Ключевые слова: магистральный газопровод, муфта, ремонт, дуговая сварка, усадка наплавленного металла, контактное давление

Поддержание украинской газотранспортной системы в надлежащем техническом состоянии за счет ремонта сваркой без вывода поврежденных участков из эксплуатации является важной научно-практической задачей. В настоящее время в практике ремонтов коррозионных повреждений труб линейной части магистральных газопроводов преобладают технологии, связанные с применением усиливающих сварных муфт [1]. Такие конструкции состоят из двух симметричных полуобечаек, которые в процессе монтажа обжимают по наружной поверхности трубы для создания плотного контакта (натяга). Как правило, подобные операции совершаются при условии снижения внутреннего давления в магистрали.

Известно, что важную роль в обеспечении надежной работы отремонтированного участка играет контактное давление ΔP_n , возникающее при установке муфты на трубу [2, 3]. Это связано не только с силовым обжатием полуобечаек во время сборки различными приспособлениями, но и дополнительным перераспределением нагрузок между стенками трубы и муфты при повышении внутреннего давления от ремонтного значения $P_{рем.}$ до рабочего P (рис. 1). Поскольку процесс сборки предполагает многослойную сварку полуобечаек между собой двумя продольными стыковыми швами, дополнительно возникает контактное давление ΔP_y вследствие усадки на-

плавленного металла. Цель данной работы состоит в том, чтобы расчетным способом определить величину ΔP_y для оценки степени ее влияния на общий уровень контактного давления ΔP_n .

В основу расчета положена идея определения реактивных напряжений σ_p в замкнутой оболочке, которые возникают после сварки продольных швов и действуют в кольцевом направлении (рис. 2). Если предположить, что напряжения σ_p распределены равномерно по сечению стенки

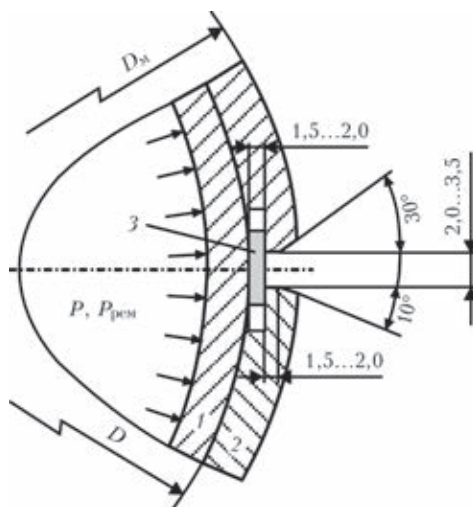


Рис. 1. Схема разделки кромок в полуобечайках муфт для сварки стыкового шва: 1, 2 — стенки трубы и муфты; 3 — подкладная пластина (D , D_m — наружные диаметры трубы и муфты соответственно; P , $P_{рем}$ — давление внутри трубопровода рабочее и во время ремонта соответственно)

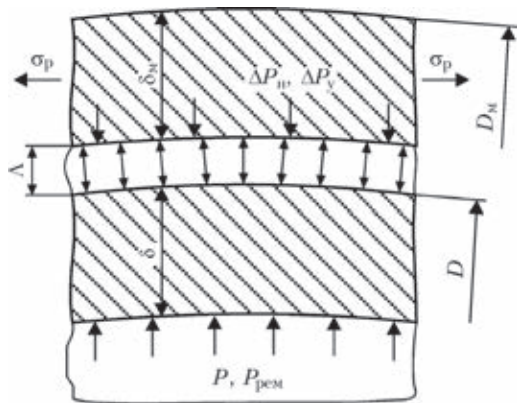


Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние стенок трубы и муфты при действии внутреннего давления: δ , δ_m — толщина стенок трубы и муфты соответственно; ΔP_n — контактное давление муфты на трубу; ΔP_y — контактное давление муфты на трубу от усадки сварных швов

муфты, а также выполняется условие плотного контакта ($\Lambda \gg 0$), то можно определить среднее контактное давление ΔP_y по формуле

$$\Delta P_y = \sigma_p \frac{2\delta_m}{D + 2\delta_m}, \quad (1)$$

где D — наружный диаметр трубопровода; δ_m — номинальная толщина стенки муфты.

Из теоретических основ проектирования сварных конструкций [4] известна расчетная зависимость для вычисления реактивных напряжений для случаев поперечного расположения сварных швов по отношению к действию реактивных напряжений:

$$\sigma_p = -\mu' E \frac{q_n}{F}, \quad (2)$$

где F — сечение сварного элемента в перпендикулярном направлении по отношению к оси шва; q_n — средняя погонная энергия сварки; E — модуль упругости материала; μ' — коэффициент, характеризующий поперечное укорочение сварного шва и определяемый по графической зависимости $\mu' = f(m)$ (рис. 3).

Для муфты сечение будет определяться:

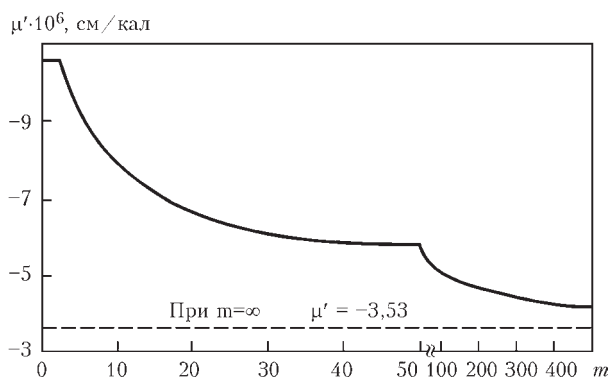


Рис. 3. Зависимость коэффициента μ' от относительной жесткости m

$$F = \pi(D + 2\delta_m)\delta_m. \quad (3)$$

Параметр m , который отражает относительную жесткость, для такой конструкции рассчитывается по формуле

$$m = 0,125 \cdot 10^6 \frac{4F}{v_{св} q_n^2}, \quad (4)$$

где $v_{св}$ — скорость сварки.

При сварке стыкового шва в несколько проходов рассчитывают условную погонную энергию по формуле

$$q_{усл.} = 340 \left(F_p + \frac{2}{\cos \theta/2} \cdot r \cdot \delta_m \right), \quad (5)$$

где F_p — площадь, которая образуется разделкой кромок стыкового шва; θ — общий угол разделки кромок; $r = 43,5 \cdot 10^{-3} \sqrt{q_n}$.

Учитывая, что полуобечайки муфты свариваются между собой двумя стыковыми швами, формулу (2) можно записать в виде:

$$\sigma_p = -\mu' E \frac{2q_{усл.}}{F}. \quad (6)$$

Рассмотрим пример расчета величины контактного давления ΔP_y для случая ремонта муфтой коррозионного повреждения с габаритными размерами в продольном S и окружном C направлениях 250×150 мм и максимальной глубиной $a = 4$ мм. Труба класса прочности X60 размером $D = 1020$ мм, $\delta = 10,5$ мм, толщина стенки муфты $\delta_m = 10,5$ мм ($\delta = \delta_m$). Для расчета примем характерный для электрода диаметром 4 мм режим сварки: $I = 140$ А, $U = 24$ В, $\eta = 0,7$, $v_{св} = 0,2$ см/с.

Тогда $q_n = 0,24IU\eta(v_{св})^{-1} = 2822$ [кал/см]; $r = 2,31$ см; $F_p = 0,44$ см².

Сечение сварного элемента в перпендикулярном направлении определим по формуле (3):

$$F = \pi(D + 2\delta_m)\delta_m = \pi \cdot (1020 + 2 \cdot 1,05) \cdot 1,05 = 244 \text{ см}^2.$$

Условную погонную энергию рассчитываем по формуле (5) с учетом того, что угол разделки кромок $\theta = 40^\circ$: $q_{усл.} = 340(0,53 + 2 \cdot 2,31 \cdot 1,05 \cdot (\cos 20^\circ)^{-1}) = 1905$ кал/см.

Относительная жесткость муфты составляет:

$$= 0,125 \cdot 10 \frac{244}{v_{св} q_n} = 108.$$

Тогда коэффициент, который определяет поперечное укорочение сварного шва, будет отвечать значению $\mu' = -4,97 \cdot 10^{-6}$ см/кал.

Величина реактивных напряжений в соответствии с (6) равняется:

$$\sigma_p = -\mu' E \frac{2q_{усл.}}{F} = 110 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}.$$

Величина среднего контактного давления между муфтой и трубой ΔP_y определяется величиной:

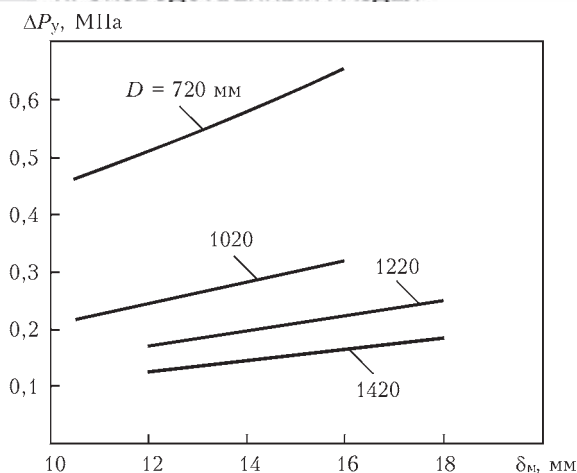


Рис. 4. Влияние толщины стенки муфты δ_m на величину контактного давления от усадки продольных сварных швов ΔP_y в зависимости от диаметра трубопровода D

$$\Delta P_y = \sigma_p \frac{2\delta_m}{D + 2\delta_m} = 2,22 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \text{ или } \Delta P_y = 0,22 \text{ МПа.}$$

На рис. 4 в графическом виде представлены результаты, полученные с применением изложенного расчетного метода, показывающие зависимость величины ΔP_y от толщины стенки муфты δ_m и диаметра трубопровода D . Для оценки степени влияния ΔP_y на уровень контактного давления ΔP_n необходимо наличие диаграмм допустимых линейных размеров утонений стенки трубы, образец которой представлен на рис. 5, и критерия обоснованного выбора величины ΔP_n . Последний имеет вид [5]:

$$\Delta P_n \geq P - [P] - \chi_1(P - P_{\text{рем}}), \quad (7)$$

где $[P]$ — допустимое давление для утонения стенки трубы, определяемое по диаграммам допустимых линейных размеров;

$$\chi_1 = \left(1 + \frac{(0,5D_m)^2 \delta}{(0,5D)^2 \delta_m} \right)^{-1}.$$

Принимая во внимание требования нормативных документов по ремонту на действующих газопроводах о том, что $P_{\text{рем}} = 0,7P$ ($P = 5,4$ МПа), для рассматриваемого примера $[P] = 0,75P$, $\chi_1 = 0,49$. Тогда в соответствии с (7) $\Delta P_n = 0,55$ МПа. Сравнивая расчетную величину с $\Delta P_y = 0,22$ МПа, можно сказать, что в данном случае контактное давление от усадки продольных сварных швов составляет существенную часть (около 40 %) от минимально необходимого контактного давления. Их суммарная величина идет в запас обеспечения работоспособности отремонтированного участка газопровода сварной муфтой.

В то же время следует отметить, что с увеличением диаметра трубы D , для дефекта с теми же габаритными размерами, величина допускаемого давления $[P]$ будет уменьшаться, что, соответственно, потребует увеличения минимально необходимого

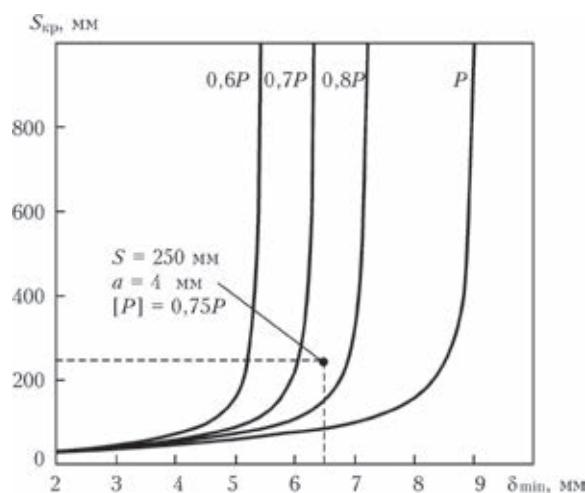


Рис. 5. Диаграмма допустимых линейных размеров утонений стенки трубы в зависимости от минимальной толщины стенки трубы $\delta_{\min}$ для газопровода 1020×10,5 мм из стали категории прочности X60 с максимальным рабочим давлением $P = 5,4$ МПа

контактного давления ΔP_n . Это приводит к выводу о том, что роль ΔP_y будет снижаться.

Таким образом можно констатировать, что наиболее существенно на разгрузку дефектной стенки трубы будет влиять усадка при сварке продольных швов муфты на газопроводах с наружным диаметром 1020 мм и менее. При ремонте магистральных газопроводов с наружными диаметрами 1220 мм и более основное внимание следует обращать на обеспечении необходимой величины контактного давления ΔP_n , а влияние величины ΔP_y следует рассматривать как незначительное. Некоторого роста величины ΔP_y можно достичь путем увеличения толщины стенки муфты δ_m , однако такой прием весьма ограничен в практическом применении вследствие ухудшения условий монтажа из-за жесткости полуобечаек и сложности в обеспечении требуемой величины контактного давления ΔP_n .

1. ГБН В.3.1-00013741-12:2011. Магистральные газопроводы. Ремонт дуговой сваркой в условиях эксплуатации: — Киев: Мин-во энергетики и угольной пром-сти Украины, 2011. — 152 с. — (Отраслевые строительные нормы Украины). — Введ. 06.09.2011.
2. Kiefner J.F. Repair of Line Pipe Defects by Full-Encirclement Sleeves // Welding J. — 1977. — № 6. — С. 26–34.
3. Методы обеспечения работоспособности длительно эксплуатируемых газопроводов, подверженных стресс-коррозии / Р.В. Агинец, А.Ф. Пужайло, Ю.В. Александров и др. // Коррозия «Территории нефтегаз». — 2012. — № 3 (23). — С. 50–61.
4. Окерблом Н.О. Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций. — М.-Л.: Машиностроение, 1964. — 420 с.
5. Махненко В.И., Олейник О.И., Шекера В.М. Определение контактного давления усиливающей муфты при ремонте трубопроводов с поверхностными дефектами // Автомат. сварка. — 2013. — № 6. — С. 12–15.

Поступила в редакцию 09.10.2015



III Международная конференция «СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ-2015»

15–16 октября 2015 г. в Санкт-Петербурге проходила III Международная конференция «Сварочные материалы-2015» (Петраньевские чтения), организованная Национальным комитетом по сварке РАН, ГНЦ ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», ОАО «ЦНИИ материалов», Санкт-Петербургским государственным политехническим университетом им. Петра Великого, Альянсом сварщиков Санкт-Петербурга и Северо-Западного региона РФ, Санкт-Петербургским обществом научно-технических знаний.

Пленарное заседание, в котором приняли участие около 100 представителей научных и учебных организаций и производственных предприятий из РФ, Украины, Казахстана, Индии, проводилось в ГНЦ ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей».

Конференция была посвящена памяти академика РАН, президента — научного руководителя ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» Игоря Васильевича Горынина.

С приветствием к участникам конференции обратились заместитель генерального директора ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» д-р техн. наук профессор Г.П. Карзов и начальник отдела сварки ОАО ЦНИИМ В.Б. Вихман.

Было заслушано 22 доклада представителей ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, ЗАО НПФ «ИТС» (Санкт-Петербург), ООО «ТМ Велтек» (г. Киев), ОАО ПО «Севмаш» (г. Северодвинск), ООО «Ижорские сварочные материалы», НИЦ ООО ТК «ОМЗ-Ижора» и др.

Наибольший интерес вызвали доклады:

д-ра техн. наук *З.А. Сидлина* (ООО «Техпром», г. Москва) «К вопросу об импортозамещении сварочных электродов», в котором приведены данные о конкурентоспособности отечественных сварочных электродов в сравнении с лучшими зарубежными образцами и описаны проблемы;

канд. техн. наук *Ю.Д. Брусницына* (ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург) «Гидроксильные группы в сварочных материалах, источники, последствия и предотвращение». В докладе рассмотрены технологические аспекты производства электродов и флюсов с позиции исключения условий, способствующих образованию флокенов в металле шва за счет ионов гидроксильных групп неметаллических включений;

д-ра техн. наук *С.Ю. Максимова* (ИЭС им. Е.О. Патона, г. Киев) «Холодные трещины в ЗТВ сварных соединений, выполненных под водой, и меры по их предотвращению», в котором рассмотрены меры по предотвращению образования холодных трещин в ЗТВ сварных соединений низколегированных сталей в процессе сварки под водой;

д-ра техн. наук *М.В. Карасева* (ЗАО НПФ «ИТС», Санкт-Петербург) «Разработки группы ИТС в области производства порошковых проволок для сварки в защитных газах». В докладе предложены марки порошковых проволок, выпускаемых на предприятиях группы ИТС. Показаны преимущества бесшовных порошковых проволок.

канд. техн. наук *А.В. Владимирова* (ООО «Росвелд», Санкт-Петербург) «Импульсная сварка покрытыми электродами — идеальная технология для сварки корня шва», в котором представлены преимущества импульсно-дуговой сварки с использованием специализированного источника питания, обеспечивающей высокое качество корневых проходов при сварке в любых пространственных положениях даже при наличии зазоров;

д-ра техн. наук *С.Г. Паршина* (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет) «Влияние композиционных сварочных проволок с никелевыми покрытиями на свойства сварных соединений из стали повышенной прочности». В докладе продемонстрировано, что при сварке стали 10ХСНД с использованием проволоки с наноконпозиционными покрытиями на основе Ni-матрицы и дисперсной фазы из фтористых солей и оксидов увеличиваются механические свойства сварного соединения на растяжение и на ударную вязкость;

канд. техн. наук *Л.Н. Орлова* (ООО «ТМ Велтек», г. Киев) «Разработка и внедрение новых технологий восстановления и изготовления ответственных деталей и технологического инструмента для металлургических предприятий».

16 октября 2015 г. была организована обзорная экскурсия по Санкт-Петербургу и посещение ООО «Ижорские сварочные материалы», где было продемонстрировано изготовление сварочных электродов и плавящихся флюсов специального назначения.

И.М. Лившиц, ведущ. специалист
ООО «Ижорские сварочные материалы»

ОЗСО ИЭС им. Е.О. Патона в цифрах и фактах

55 лет успешного опыта по внедрению новых технологий и оборудования,
разрабатываемых Институтом электросварки им. Е.О. Патона
и Опытным конструкторско-технологическим бюро.

Сегодня Заводом выпускается **3000 единиц оборудования ежемесячно** или около 40000 в год.

Сварочное оборудование, выпускаемое серийно

♦ **инверторная сварочная техника** (9 моделей) — для ручной дуговой и аргонодуговой сварки на токах от 160 до 250 А;

♦ **классическое оборудование:**

– сварочные трансформаторы (7 моделей) — для электродуговой сварки и переплава металлов на токах от 250 до 10000 А;

– сварочные полуавтоматы (5 моделей) — для полуавтоматической сварки на токах от 150 до 650 А;

– сварочные выпрямители (4 модели) — для электродуговой сварки на токах от 300 до 5000 А;

– сварочные тракторы (3 модели) — для автоматической сварки под флюсом на токах до 1200 А;

– выпрямители для многопостовой ручной дуговой сварки (2 модели) — на токи от 650 до 5000 А, с возможностью питания до 30 постов полуавтоматической сварки в среде защитных газов.

В 2015 г. в **серийное производство запущены ВДУ** — универсальные сварочные выпрямители для автоматической сварки под слоем флюса и полуавтоматической сварки в среде защитных газов — **2 модели**, а также балластные реостаты для регулировки сварочного тока на каждом посту от многопостовых выпрямителей.

Собственная линия по производству сварочных электродов марок

Elite, АНО-4, АНО-21, АНО-36, УОНИ-13/55, УОНИ-13/45, Т-590, ОЗЛ-8, ЦЛ-11, ЦЧ-4.

Продукция Опытного завода сертифицирована согласно украинским и европейским стандартам (ЕС), налажена работа сервисного центра по гарантийному обслуживанию и технической поддержке. Планируется сертификация сварочных аппаратов инверторного типа в США и вывод продукции ОЗСО на мировой рынок.

Количество сотрудников ОЗСО — более 300 человек.

Основные клиенты ОЗСО: АрселорМиттал, ДТЭК, Запорожсталь, Киевводоканал, Кивэнерго, Нибулон, Одессагаз, Укроборонпром, Украинская железная дорога, UMG Group, АВ Метал Груп, УГМК, Сеть металлобаз Виконт, Днепр-Азот, Запорожский титано-магнийевый комбинат, Интерпайп Украина, Никопольский завод ферросплавов, Кривбассжелезрудком, Мироновский хлебопродукт, НАЭК Энергоатом и др.

300 дилеров и дистрибьюторов по всей Украине: Эпицентр, Новая Линия, ОЛДИ, АРС-керамика, Будмен, Альцест, Будпостач, Профи-трейд, ЮНИТ-Т и др.

География экспорта: Россия, Беларусь, Грузия, Молдова, Казахстан, Азербайджан, Польша, Чехия, Объединенные Арабские Эмираты, Мьянма, Экваториальная Гвинея и др.

Продукция ОЗСО успешно конкурирует с иностранными производителями, а по соотношению «цена-качество» даже вытесняет китайских производителей сварочного оборудования. Примером тому является **контракт с сетью торговых гипермаркетов ЭпицентрК на производство и поставку оборудования под торговой маркой EVO**. Начиная с апреля 2015 г. ОЗСО выпускает по 500 сварочных аппаратов EVO в месяц, а в прошлом году подобные сварочные аппараты для ЭпицентрК поставлялись из Китая.

С февраля 2016 г. ОЗСО начнет поставлять в Эпицентр самый бюджетный вариант сварочного инвертора на 140 А под маркой **MAX Power**, который составит успешную конкуренцию самым дешевым сварочным аппаратам китайского производства. Сейчас продукция **торговой марки ПАТОН** занимает 40 % всего сварочного ассортимента на торговых полках сети Эпицентр и Новая Линия, а после вывода модели MAX Power — достигнет 60 %.

В октябре 2015 г. ОЗСО выполнил контракт на поставку сварочного оборудования для переоснащения одного из самых известных сталелитейных заводов Группы компаний «CKD

Kutna Hora a.s.» (Чешская Республика), который является крупнейшим производителем качественной литой продукции.

С 2014 г. действует 5-летняя гарантия на сварочные инверторы серий АДИ и ВДИ. Освоено серийное производство инвертора ПАТОН ВДИ-250Р «Professional» для ручной дуговой и аргодуговой сварки, аппарата плазменной резки инверторного типа ПРИ-40S. Серийно выпускаются выпрямители для многопостовой ручной дуговой сварки штучными электродами типа ВДМ.

С июня 2015 г. выпускается новая серия сварочных инверторов ЕСО — для ручной дуговой сварки плавящимся электродом на токи 160, 200 и 250 А.

Совместные проекты ОЗСО и ОКБ

2013 г. — контракт с ОАО «Турбоатом»: разработка новой сварочной технологии и оборудования для изготовления сварных комбинированных роторов при помощи автоматической сварки под флюсом в узкую разделку. Техническая документация разработана ОКБ ИЭС им. Е.О. Патона. Комплект оборудования для автоматической дуговой сварки под флюсом кольцевых швов в глубокую разделку роторов мощных турбин произвел ОЗСО, а именно:

- ♦ четыре аппарата для сварки в узкую разделку;
- ♦ четыре источника питания постоянного тока;
- ♦ четыре системы управления для двух порталных установок.

2014 г. — контракт с Государственной нефтяной компанией Азербайджанской Республики (SOCAR): проект по отделению двух понтонов от блока методом направленного взрыва при строительстве морской стационарной платформы № 7 на месторождении «Гюнешли» в Каспийском море. Разработаны новые методы, технологии и оборудование для глубоководной и наземной сварки и резки, которые востребованы на каспийском шельфе, богатом нефтью и природным газом.

2014 г. — контракт с ОКБ (для Укрспецэкспорт): разработка и выпуск партии сварочного оборудования для тропического климата с улучшенными характеристиками и повышенной надежностью:

- ♦ 26 комплектов ВС-650 СР с БП-608 в тропическом исполнении;
- ♦ 1 комплект ВДИ-200Р в тропическом исполнении.

2015 г. — проект по орбитальной сварке: внедрение новой технологии и оборудования для электродуговой автоматической сварки при строительстве трубопроводов. Разработан технический проект комплекса оборудования, технологии и сварочных материалов для автоматической электродуговой сварки неповоротных стыков труб порошковой проволокой с принудительным формированием металла шва. Комплекс оборудования обеспечивает сварку неповоротных стыков труб магистральных трубопроводов с принудительным формированием шва, включая автоматическую сварку корня шва на внутритрубном центраторе с подкладным кольцом. Ведутся переговоры по поставке оборудования в Укртрансгаз.

2015 г. — проект по созданию твердотопливных котлов: совместно с ИЭС разрабатывается и к концу 2015 года планируется выпуск серии современных твердотопливных котлов оперативного отопления и котлов водяного отопления жилых помещений от 100 до 600 м³.

2015 г. — проект по созданию установки для приварки шпилек и бонок (для предприятий Укроборонпрома): разработка и выпуск установки для приварки шпилек и бонок на базе ВДУ-6303П и трех комплектов инверторных источников типа ВДИ-250S.

План разработок ОЗСО на 2015–2016 гг.

- ♦ полуавтомат ПСИ-315Р (380 В) для ручной аргодуговой сварки, ручной дуговой сварки покрытыми электродами и полуавтоматической сварки;
- ♦ инверторный полуавтомат в одно- и двухкорпусном исполнении на 250 А для ручной дуговой сварки, полуавтоматической сварки углеродистых сталей с цифровым управлением;
- ♦ инверторный аппарат для сварки алюминия;
- ♦ выпрямитель дуговой универсальный на 630 А с ПВ 60 % для ручной дуговой сварки, полуавтоматической сварки в среде защитного газа и сварки под слоем флюса.

Основная задача ОЗСО на ближайшее время — создание нового востребованного оборудования для сварки и вывод предприятия в лидеры по производству сварочного оборудования в Восточной Европе.

ПОДПИСКА 2016 — на журнал «АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
720 грн.	1440 грн.	3600 руб.	7200 руб.	90 дол. США	180 дол. США

В стоимость подписки включена стоимость доставки заказной бандеролью.

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



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

В открытом доступе выпуски журнала с 2009 по 2013 гг. в формате * pdf.

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

РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

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

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

Все файлы в формате IBM PC

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

Стоимость рекламы и оплата

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

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

Контакты:

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

© Автоматическая сварка, 2015

Подписано к печати 11.11.2015. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 9,09. Усл.-отт. 10,09. Уч.-изд. л. 10,22 + 5 цв. вклеек.
Печать ООО «Фирма «Эссе». Тираж 950 экз.
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.