

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

Ю. С. Борисов, Г. М. Григоренко,
А. Т. Зельниченко, А. Я. Ищенко,
В. И. Кирьян, И. В. Кривцун,
С. И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.),
Ю. Н. Ланкин,
В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),
Л. М. Лобанов, А. А. Мазур,
В. И. Махненко, О. К. Назаренко,
В. Д. Позняков,
И. К. Походня, И. А. Рябцев,
Б. В. Хитровская (отв. секр.),
В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

Н. П. Алешин (Россия)
Гуань Цяо (Китай)
У. Дилтай (Германия)
П. Зайффарт (Германия)
А. С. Зубченко (Россия)
В. И. Лысак (Россия)
Н. И. Никифоров (Россия)
Б. Е. Патон (Украина)
Я. Пилярчик (Польша)
Г. А. Туричин (Россия)
Чжан Янмин (Китай)
Д. фон Хофе (Германия)

УЧРЕДИТЕЛИ:

Национальная академия наук Украины,
Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАНУ,
Международная
ассоциация «Сварка»

ИЗДАТЕЛЬ:

Международная ассоциация
«Сварка»

Адрес редакции:

03680, Украина, Киев-150,
ул. Боженко, 11
Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАНУ
Тел.: (38044) 287 6302, 529 2623
Факс: (38044) 528 3484, 529 2623
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Редакторы:

Е. Н. Казарова, Т. В. Юштина
Электронная верстка:
А. И. Сулима, И. Р. Наумова,
И. В. Петушков

Свидетельство о государственной
регистрации КВ 4788
от 09.01.2001

**Журнал входит в перечни
утвержденных ВАК Украины
и Российской Федерации изданий
для публикации трудов
соискателей ученых степеней**

За содержание рекламных
материалов редакция журнала
ответственности не несет
Цена договорная
Тираж 1000 экз.

СОДЕРЖАНИЕ

Институту электросварки им. Е. О. Патона — 75 3
НОВОСТИ 5

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

*Кривцун И. В., Харламов М. Ю., Петров С. В., Маринский
Г. С., Коржик В. Н., Чернец А. В.* Численный анализ
характеристик дуговой плазмы в паровоздушных
плазмотронах с тугоплавким катодом 7
Шуба И. В. Механическое воздействие газового потока
на поверхность стенок канала проплавления при газо-
лазерной резке 16
Ланкин Ю. Н., Суший Л. Ф., Шулым В. Ф. Система управ-
ления током пучка прямоканальной электронно-лучевой
сварочной пушки 21
*Рябцев И. А., Черняк Я. П., Рябцев И. И., Жданов В. А.,
Богайчук И. Л.* Структура и износостойкость наплавленного
металла 20Х5М2ФС, легированного серой и фосфором 24
*Устинов А. И., Матвиенко Я. И., Полищук С. С., Шишкин
А. Е.* Исследование фазовых превращений и пластической
деформации при непрерывном нагреве многослойной фольги
Al/Cu 29

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

*Патон Б. Е., Шелягин В. Д., Ахонин С. В., Топольский В. Ф.,
Хаскин В. Ю., Петриченко И. К., Бернацкий А. В., Мищенко
Р. Н., Сиора А. В.* Лазерная сварка титановых сплавов 35
Белоус В. Ю. ТИГ-сварка толстолистового титана с
применением формирующей подкладки 40
Орыщенко А. С., Осокин Е. П., Павлова В. И., Зыков С. А.
Биметаллические сталеалюминиевые соединения в
судостроительных корпусных конструкциях 43
Дегтярев В. А., Шульгинов Б. С., Кныш В. В. Дефор-
мационный критерий эффективности упрочнения сварных
соединений высокочастотной механической проковкой 48

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Махненко В. И., Романова И. Ю. Расчетное прогнозирование
долговечности сварных конструкций при двухчастотном
спектре циклического нагружения 52

ХРОНИКА

Новокраматорскому машиностроительному — 75 55
Открытие мемориальных досок 56
Международная выставка «Нева-2009» 57

ИНФОРМАЦИЯ

Технологический парк «ИЭС им. Е. О. Патона» сегодня 59
Отечественные агломерированные флюсы для многодуговой
сварки 60

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B. E. PATON

Yu. S. Borisov, G. M. Grigorenko,
A. T. Zelnichenko,
A. Ya. Ishchenko, I. V. Krivtsun,
S. I. Kuchuk-Yatsenko (vice-chief ed.),
V. I. Kiryan, Yu. N. Lankin,
V. N. Lipodaev (vice-chief ed.),
L. M. Lobanov, A. A. Mazur,
V. I. Makhnenko,
O. K. Nazarenko, I. K. Pokhodnya,
V. D. Poznyakov, I. A. Ryabtsev,
B. V. Khitrovskaya (exec. secr.),
V. F. Khorunov, K. A. Yushchenko

THE INTERNATIONAL
EDITORIAL COUNCIL:

N. P. Alyoshin (Russia)
D. von Hofe (Germany)
Guan Qiao (China)
U. Dilthey (Germany)
P. Seyffarth (Germany)
A. S. Zubchenko (Russia)
V. I. Lysak (Russia)
N. I. Nikiforov (Russia)
B. E. Paton (Ukraine)
Ya. Pilarczyk (Poland)
G. A. Turichin (Russia)
Zhang Yanmin (China)

FOUNDERS:

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

PUBLISHER:

International Association «Welding»

Address of Editorial Board:

11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine

Tel.: (38044) 287 63 02, 529 26 23

Fax: (38044) 528 04 86

E-mail: journal@paton.kiev.ua

http://www.nas.gov.ua/pwj

Editors:

E. N. Kazarova, T. V. Yushchina

Electron galley:

A. I. Sulima,

I. R. Naumova,

I. V. Petushkov

State Registration Certificate

KV 4788 of 09.01.2001

All rights reserved

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

Permission to reproduce material
contained in this journal must be obtained
in writing from the Publisher
Run 1000 c.

CONTENTS

The E. O. Paton Electric Welding Institute is 75	3
NEWS	5

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

<i>Krivtsun I. V., Kharlamov M. Yu., Petrov S. V., Marinsky G. S., Korzhik V. N., Chernets A. V.</i> Numerical analysis of characteristics of arc plasma in vapor-air plasmatrons with a refractory cathode	7
<i>Shuba I. V.</i> Mechanical effect of gas flow on the surface of penetration channel walls in laser cutting	16
<i>Lankin Yu. N., Sushiy L. F., Shulym V. F.</i> System of beam current control of directly heated electron beam welding gun	21
<i>Ryabtsev I. A., Chernyak Ya. P., Ryabtsev I. I., Zhdanov V. A., Bogajchuk I. L.</i> Structure and wear resistance of deposited metal of 20Kh5M2FS steel, alloyed with sulphur and phosphorus	24
<i>Ustinov A. I., Matvienko Ya. I., Polishchuk S. S., Shishkin A. E.</i> Investigation of phase transformations and plastic deformation at continuous heating of multilayer Al/Cu foil	29

INDUSTRIAL

<i>Paton B. E., Shelyagin V. D., Akhonin S. V., Topolsky V. F., Khaskin V. Yu., Petrichenko I. K., Bernatsky A. V., Mishchenko R. N., Siora A. V.</i> Laser welding of titanium alloys	35
<i>Belous V. Yu.</i> TIG-welding of thick-plate titanium using a forming backing	40
<i>Oryshchenko A. S., Osokin E. P., Pavlova V. I., Zykov S. A.</i> Bi-metal steel-aluminium joints in ship-building hull structures	43
<i>Degtyaryov V. A., Shulginov B. S., Knysh V. V.</i> Deformation criterion of effectiveness of welded joint strengthening by high-frequency mechanical peening	48

BRIEF INFORMATION

<i>Makhnenko V. I., Romanova I. Yu.</i> Calculated prediction of life of welded structures at two-frequency spectrum of cyclic loading	52
--	----

NEWS

Novokramatorsk machine-building plant is 75	55
Opening of memorial plaques	56
International exhibition «Neva-2009»	57

INFORMATION

Technological park «The E. O. Paton Electric Welding Institute» today	59
National agglomerated fluxes for multi-arc welding	60

ИНСТИТУТУ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА — 75

2 октября в ИЭС им. Е. О. Патона состоялось торжественное собрание в связи с 75-летием института, всемирно известного научно-исследовательского центра в области сварки, спецэлектрометаллургии и нанесения защитных покрытий. В нем приняли участие сотрудники института, а также многочисленные гости — руководители ведомств, предприятий, ведущих академических, научно-исследовательских учреждений и высших учебных заведений Украины.

Собрание открыл Президент Национальной академии наук Украины директор ИЭС им. Е. О. Патона академик Б. Е. Патон с докладом об основных этапах деятельности института в различные периоды. Он отметил, что ... «Институт имеет мощный научный потенциал, развивается, совершенствуются его структура и система управления — все направлено на дальнейшее развитие сварки и родственных процессов, на решение базовых проблем производства».

Борис Евгеньевич искренне поблагодарил всех тех, кто поздравил коллектив института с юбилеем, дал высокую оценку его деятельности и высказал надежду в отношении дальнейшего развития института и достижения молодыми учеными новых высоких результатов в теории и практике сварочного производства.

Среди поздравивших десятки научных учреждений, предприятий и организаций, коллеги и друзья из Украины, России, Беларуси, Болгарии, Армении, Грузии, Казахстана, Германии, Словакии, Узбекистана.

Затем заместитель главы Секретариата Президента Украины Ю. П. Богуцкий зачитал приветствие В. А. Ющенко коллективу института, в котором высказана уверенность, что «своим высокопрофессиональным и вдохновенным трудом коллектив института и далее будет вносить весомый вклад в развитие отечественной и мировой науки, в укрепление экономики украинского государства». Ю. П. Богуцкий огласил Указ Президента Украины

о награждении государственными наградами Украины сотрудников института.

От имени Председателя Верховной Рады Украины В. М. Литвина приветствие зачитал В. Б. Яловой. В нем отмечено, что неутомимое творчество представителей известной Патоновской школы содействовало преобразованию сварки в ведущий технологический процесс во многих отраслях народного хозяйства, который находит применение в различных средах, включая водные глубины и космические высоты. Сегодня уже есть весомые результаты и в медицине — получение надежных сварных соединений мягких живых тканей. Научные достижения и разработки патоновцев, созданные ими технологии — это знаковые этапы развития мировой науки и техники. Ученые института убедительно доказали, что способны решать научно-технические проблемы любой сложности.

А. Н. Гуржий зачитал приветствие Премьер-министра Украины Ю. В. Тимошенко. В нем выражена сердечная благодарность коллективу института за самоотверженный труд и признанные научно-технические достижения, которые делают нашу экономику конкурентоспособной и приумножают научный авторитет Украины в мире.

После кратких выступлений директора ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона В. С. Романюка и директора Опытного завода сварочного оборудования В. И. Степахно были заслушаны приветствия и теплые поздравления в адрес коллектива института от Президиума НАН Украины (А. Г. Шпак), Отделения физико-технических проблем материаловедения НАН Украины (И. К. Походня), НТУУ «Киевский политехнический институт» (Ю. И. Якименко), Министерства промышленной политики (С. Г. Грищенко) и Председателя Голосеевской районной госадминистрации г. Киева (А. Г. Незнал).

В заключение состоялся праздничный концерт мастеров искусств и художественных коллективов Украины.

У К А З

ПРЕЗИДЕНТА УКРАЇНИ № 779/2009

Про відзначення державними нагородами України працівників Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України, м. Київ

За вагомий особистий внесок у розвиток вітчизняної науки, техніки і технологій у галузі зварювання матеріалів і конструкцій, багаторічну плідну наукову діяльність та з нагоди 75-річчя Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона **постановляю**:

Нагородити орденом князя Ярослава Мудрого V ступеня

ЮЩЕНКА Костянтина Андрійовича — заступника директора, доктора технічних наук, академіка НАН України

Нагородити орденом «За заслуги» II ступеня

КОСЕНКА Петра Олексійовича — директора державного підприємства «Дослідний завод зварювальних матеріалів Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України»

ЛОБАНОВА Леоніда Михайловича — заступника директора, доктора технічних наук, академіка НАН України

Нагородити орденом «За заслуги» III ступеня

СТРЕЛЬНИКОВА Михайла Олексійовича — головного технолога акціонерного товариства «Дослідний завод зварювального устаткування Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України»

Нагородити орденом «За мужність» III ступеня

КОЦЮБУ Сергія Миколайовича — водолаза

Присвоїти почесні звання:

«ЗАСЛУЖЕНИЙ ДІЯЧ НАУКИ І ТЕХНІКИ УКРАЇНИ»

КИР'ЯНУ Валерію Івановичу — завідувачеві відділу, докторові технічних наук, члену-кореспонденту НАН України

НЕДОССІЦІ Анатолію Яковичу — завідувачеві відділу, докторові технічних наук, професору

СТЕПАХНУ Володимирі Івановичу — голові правління акціонерного товариства «Дослідний завод зварювального устаткування Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України», докторові фізико-математичних наук, професору

«ЗАСЛУЖЕНИЙ ПРАЦІВНИК ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ»

БУБЛИКУ Володимирі Петровичу — газозварникові

ВАРИВОДІ Миколі Олексійовичу — електрозварникові

ГЕРАЦЕНКУ Віктору Борисовичу — бригадирові штампувальників акціонерного товариства «Дослідний завод зварювального устаткування Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України»

«ЗАСЛУЖЕНИЙ МАШИНОБУДІВНИК УКРАЇНИ»

САХАРНОВУ Василю Олексійовичу — старшому науковому співробітникові

СТЕСІНУ Віктору Володимировичу — головному конструкторові державного підприємства «Дослідне конструкторське технологічне бюро Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України».

Президент України Віктор ЮЩЕНКО
29 вересня 2009 року

КОМПАНИЯ «ФРОНИУС» ПРЕДЛАГАЕТ

Вместо сварки — пайка СМТ. Неразъемные соединения широко используются на заводе фирмы «Vauxhall Motors» в Элсмир-Порте, близ Ливерпуля. Например: листы из оцинкованной стали толщиной 0,8 мм необходимо соединить с высокопрочной ТРИП-сталью (сталь с удовлетворительной пластичностью) в зоне днища и на боковых поверхностях кузова. Применение точечной сварки практически невозможно из-за слишком боль-

ническое покрытие, так как этот «более холодный» процесс сохраняет цинковый слой и вызывает меньшую деформацию, обеспечивая достаточно надежное соединение. Кроме того, разбрызгивание сводится практически к нулю, что означает отказ от последующей механической обработки.

Использование пайки СМТ исключает и некоторые другие проблемы на фирме «Vauxhall Motors». Во-первых, экономит время и рабочую силу, которые обычно расходуются на механическую обработку после сварки. Во-вторых, исключаются простои, вызванные

СМТ с газовым охлаждением. Сварочные горелки СМТ с газовым охлаждением удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к идеальному процессу сварки. Сварочная проволока движется вперед и назад с помощью цифрового управления до 90 раз в секунду, что снижает тепловложение. Кроме того, капля отделяется точно во время короткого замыкания, что исключает разбрызгивание. В варианте с газовым охлаждением не требуется никаких компромиссов при выборе автоматической или ручной сварки СМТ. Совсем, наоборот, так как сварочные горелки с газовым охлаждением отличаются рядом особых свойств.

Весь путь газ проходит от газового баллона до газового сопла по одному шлангу, что обеспечивает отсутствие потерь при подаче газа. Еще одно преимущество — применение революционной системы QuickSnap (быстрый щелчок), которая позволяет заменить газовое сопло в течение нескольких секунд: нажал, прокрутил, заменил. Применение этой системы при роботизированной сварке исключает случайное отсоединение этой системы при очистке, поскольку она надежно закреплена на месте.

Водяной пар лучше режет металл. Как показывает практика, усложненные условия труда на строительных площадках и при демонтаже установок, равно как и дифференцированные требования, предъявляемые на производстве, определяют, что резка металла с помощью плазмы водяного пара выигрывает по сравнению с другими методами. Специализирующаяся на очистных сооружениях компания FSM разделяет биметаллические стали и стали с красочным покрытием с помощью TransCut 300 быстрее и проще, чем при использовании болгарки, работа с которой сопро-



шого зазора между перекрывающимися листами или между деталями из листового металла с большим радиусом, а также из-за слишком большого износа электродов. Обычная дуговая сварка сопровождается сильным разбрызгиванием, материал деформируется в результате высокого тепловложения и величина зазора становится еще больше. Ухудшает ситуацию прерывание производственного процесса, по крайней мере, раз за смену в результате нарушения подачи проволоки через горелку.

На заводе «Опель» в Бохуме (Германия) так решают подобные проблемы: они заполняют относительно большие зазоры в днище автомобиля с помощью пайки СМТ. При этом они не нарушают гальва-

прерыванием подачи проволоки. Кроме того, мундштуки горелок, обычно подверженные сильному износу, что вызывает необходимость замены одного или двух из них каждую смену, теперь служат долго и надежно.

СМТ с газовым охлаждением. Несмотря на то что горелки с газовым охлаждением более подходят для нижней границы диапазона возможностей процесса сварки МИГ/МАГ, рынок требует систем с газовым охлаждением, особенно в Америке и Азии. А это уже «разрешающий» сигнал для «Fronius». Однако для горячего и холодного процесса СМТ это не так-то легко реализовать. Тем не менее, уже существует сварочная горелка



вождается образованием пыли. Для производителя мотоциклов КТМ убедительным доводом в пользу этого метода являются повышение производительности и здоровая рабочая атмосфера. Удобный в обращении аппарат для резки и разделения от «Fronius», обладающий высокой мобильностью, не нуждается ни в подводе сжатого воздуха, ни в использовании компрессора или больших, тяжелых газовых баллонов.

Главным отличием системы TransCut, разработанной компанией «Fronius», является использование в качестве плазменной среды водяного пара. Плазма обеспечивает аккуратную резку при температуре примерно 20000 °С. Это означает, что при работе вредные вещества практически не выделяются ни в окружающую среду, ни на разрезаемый материал. Плазма образуется из жидкости, похожей на воду, которая находится в баке вместимостью 1,5 л. Для его пополнения используют картриджи (0,7 л). Для питания достаточно подключения к сети с напряжением 230 В или к генератору. По этой причине и благодаря своей малой массе (14,6 кг) эта система обеспечивает почти неограниченную мобильность.

Система для плазменной резки с использованием водяного пара образцово выполняет различные задачи по разделению строительной и высоколегированной стали, алюминия, меди, латуни и других токопроводящих материалов. TransCut 300 режет листы толщиной до 6 мм и выполняет аккуратные разделительныерезы материала толщиной до 10 мм. Поверхности реза идеально подходят для последующих сварочных работ, поскольку они, в отличие от поверхностей, полученных при резке газовой плазмой не содержат повышенной концентрации азота, кислорода, углерода или водорода.

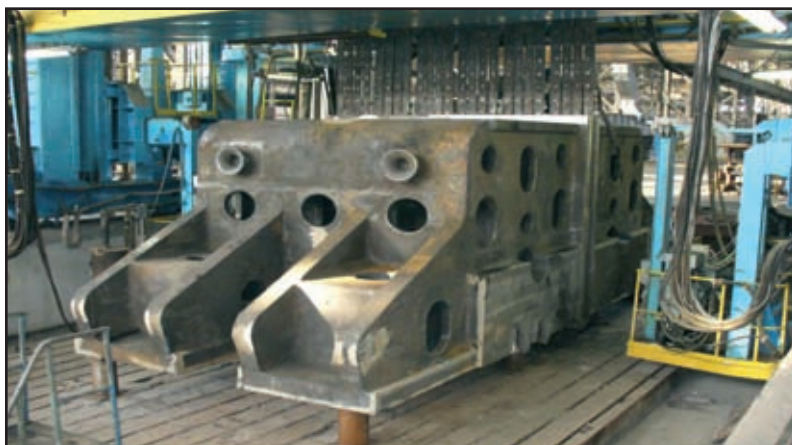
ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ СВАРКА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРЕССОВ

ЗАО «НКМЗ» — один из крупнейших заводов тяжелого машиностроения в СНГ и обладает уникальными возможностями изготовления оборудования различного назначения благодаря постоянному техни-

изовде крупных базовых деталей массой до 300 т для кузнечно-прессового, прокатного, энергетического и другого оборудования принадлежит технологии электрошлаковой сварки (ЭШС). Внедренная и освоенная на НКМЗ (впервые в тяжелом машиностроении) технология и оборудование ЭШС при плодотворном сотрудничестве с Институтом электросварки им. Е. О. Патона постоянно развивается и совершенствуется.

Новым достижением в применении ЭШС на заводе является освоение сварки изделий гидравлических прессов, при изготовлении которых впервые в мировой практике осуществлено электрошлаковое соединение с толщиной свариваемого сечения 3420 мм (предыдущий предел максимальной свариваемой толщины составлял 2650 мм при ЭШС деталей пресса усилием 650 МН, изготовленного на заводе в середине 70-х годов прошлого столетия для Франции, г. Иссуар).

Сварка станин выполнялась на установке ЭШС больших толщин, оснащенной свароч-



ческому перевооружению (освоение прогрессивных процессов в сталеплавильном, сварочном производствах, оснащение современным станочным оборудованием с высокой точной механической обработкой). При этом определяющая роль в расширении технологических возможностей при про-

ными аппаратами АШ-110 конструкции Института электросварки им. Е. О. Патона. В процессе ЭШС были приняты соответствующие технологические меры, обеспечивающие получение требуемой точности размеров, качества и свойств сварного соединения.



ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ В ПАРОВОЗДУШНЫХ ПЛАЗМОТРОНАХ С ТУГОПЛАВКИМ КАТОДОМ

Чл.-кор. НАН Украины **И. В. КРИВЦУН** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
М. Ю. ХАРЛАМОВ, канд. техн. наук (Восточноукр. нац. ун-т им. В. Даля, г. Луганск),
С. В. ПЕТРОВ, **Г. С. МАРИНСКИЙ**, **В. Н. КОРЖИК**, **А. В. ЧЕРНЕЦ**, доктора техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлена математическая модель, описывающая турбулентное течение электродуговой плазмы в паровоздушных плазмотронах с тугоплавким катодом. Численно исследовано влияние параметров режима работы плазмотрона и рода используемого плазмообразующего газа на электрические и энергетические характеристики дуги, а также тепловые и газодинамические характеристики плазменного потока, генерируемого таким плазмотроном.

Ключевые слова: дуга, электрические и энергетические характеристики, численный анализ, дуговая плазма, тугоплавкий катод, паровой плазмотрон

Плазменные источники энергии находят все большее применение для нужд самых различных отраслей промышленного производства.

Плазменно-дуговые процессы сегодня с успехом используют в металлургическом и сварочном производстве для выплавки металлов и сплавов, нанесения различного рода покрытий, резки, а также в химическом производстве и др.

В последние годы плазма начинает применяться в процессах переработки отходов, особо опасных, когда традиционные способы не могут удовлетворить современные требования экологической безопасности [1–8].

Одним из перспективных направлений в современной плазменной технике, в частности, в области создания новых плазменных генераторов (плазмотронов) является применение так называемых паровых плазмотронов, использующих в качестве плазмообразующего газа водяной пар, уникальные свойства которого обуславливают совершенно новые возможности плазмотронов.

Паровые плазмотроны с высокой степенью эффективности могут быть применены для нанесения различного типа тугоплавких покрытий, использованы в плазмохимии, процессах уничтожения отходов, при резке и пр.

Эффективность работы паровых плазмотронов напрямую зависит от правильного выбора их конструктивных параметров плазмотрона и технологических режимов его работы. В значительной степени это обусловлено пониманием физических процессов, протекающих в плазмотроне, и правильной оценкой основных характеристик генерируемого им плазменного потока.

С целью оптимизации конструкции парового плазмотрона и выбора оптимальных режимов его работы была разработана соответствующая математическая модель, описание которой представлено в настоящей работе.

Постановка задачи. Рассмотрим основные условия, при которых проводился численный анализ характеристик дуговой плазмы в плазмотроне (плазменном генераторе). Схема исследуемого плазмотрона представлена на рис. 1. Данная схема соответствует конструкции реального плазмотрона, используемого, например, в установке для пароплазменной переработки органических материалов. Полагалось, что дуга постоянного тока I горит с тугоплавкого катода W и замыкается на аноде плазмотрона на некотором расстоянии Z_A от начального сечения ($z = 0$), расположенного вблизи рабочего конца катода. На начальном участке разряд стабилизируется стенкой цилиндрического канала катодного сопла, имеющего длину Z_C и радиус R_C (рис. 1). Через данное сопло подается плазмообразующий газ аргон с достаточно малым массовым расходом G_1 , который необходим для обеспечения защиты от окисления рабочего конца катода и поддержания устойчивого горения электрической дуги. Этот газ нагревается и ускоряется дугой и истекает в более широкий канал радиусом R_1 , в который сразу же за катодным соплом (при $z = Z_C$) через соосный кольцевой канал $R_C \leq r \leq R_1$ подается основной плазмообразующий газ, например, воздух или водяной пар. Основной плазмообразующий газ поступает в канал относительно холодным и имеет массовый расход G_2 , значительно превышающий расход газа, который подается через катодное сопло. Это позволяет при анализе дальнейшего течения плазмы не учитывать смешивание этих плазмообразующих газов

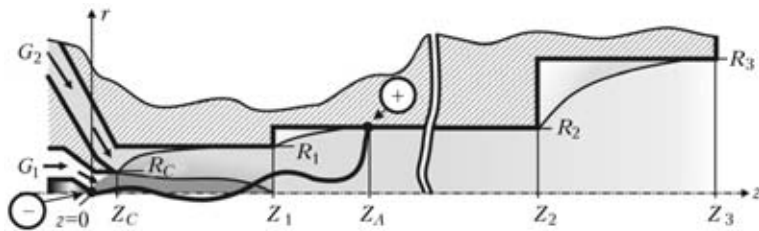


Рис. 1. Расчетная схема плазматрона

и полагать, что через канал плазматрона протекает только основной плазмообразующий газ с общим массовым расходом $G_1 + G_2$. Предполагается также, что в области анодной привязки ток дуги плавно уменьшается и далее (при $z > z_A$) имеет место инерционное движение бестоковой плазмы в канале плазматрона, а после сечения Z_3 происходит истечение плазменной струи в окружающую среду с давлением, близким к атмосферному.

Следует отметить, что канал плазматрона имеет достаточно сложную геометрию и содержит несколько участков расширения (при $z = z_C, z_1, z_2$), на каждом из которых происходит существенная перестройка характеристик течения и соответствующее расширение плазменного потока. В области каждого участка расширения происходят достаточно сложные газодинамические явления, включающие возникновение областей обратного течения плазменной струи за уступом и т. д. Для корректного описания подобных явлений необходимо использовать полную систему уравнений Навье–Стокса. Однако ввиду того, что цилиндрические участки канала имеют достаточно большую длину, возмущения, вносимые в плазменный поток областями расширения канала, не будут оказывать заметного влияния на параметры дуговой плазмы вблизи выхода из соответствующего участка канала и характеристики течения здесь будут приближаться к асимптотическим. Это позволяет использовать для описания тепловых и газодинамических процессов, протекающих в рассматриваемом плазматроне, упрощенную систему магнитогазодинамических (МГД) уравнений, записанных в приближении пограничного слоя [9–11].

Учитывая, что в рассматриваемом плазматроне осуществляется прокачка большого количества плазмообразующих газов, в нем, как правило, реализуется турбулентный режим течения плазмы. При этом параметры плазменного потока изменяются случайным образом во времени вокруг своих средних значений. Для описания турбулентного течения плазмы используется гипотеза Бусинеска (модель турбулентной вязкости), исходя из того, что турбулентность является гидродинамической (т. е. пренебрегая пульсациями электромагнитных величин) и считая пульсации давления малыми.

При математическом описании течения плазмы в канале рассматриваемого плазменного генератора использовали следующие допущения [10–12]:

плазменная система отличается цилиндрической симметрией, а протекающие процессы предполагаются стационарными;

основной плазмообразующий газ подается осесимметричным потоком через кольцевой канал соосно плазмообразующему газу, который поступает через катодное сопло;

смешивание газовых потоков не учитывается и полагается, что после начала их взаимодействия (при выходе из катодного канала) далее через плазматрон протекает плазмообразующий газ, идентичный по составу поступающему через кольцевой канал, с общим для обоих потоков массовым расходом;

предполагается, что возмущения, вносимые в поток при обтекании уступов в плоскостях расширений канала, не оказывают существенного влияния на тепловые и газодинамические характеристики струи;

плазма находится в состоянии локального термодинамического равновесия, собственное излучение плазмы объемное;

основным механизмом нагрева плазмы являются джоулево тепловыделение (работой сил давления и вязкой диссипацией можно пренебречь), а перенос энергии в плазменном потоке происходит за счет теплопроводности и конвекции (естественная конвекция в расчет не принимается);

течение плазмы вязкое дозвуковое, режим течения турбулентный;

внешние магнитные поля отсутствуют.

Исходные уравнения. С учетом сделанных допущений газодинамические и тепловые характеристики плазменного потока могут быть описаны следующей системой МГД уравнений в приближении турбулентного пограничного слоя для осредненных по времени значений температуры и скорости плазмы [10, 11]:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho \bar{v}) = 0; \quad (1)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial z} + \bar{v} \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \bar{\eta} \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(p + \mu_0 \frac{H^2}{2} \right); \quad (2)$$

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial z} + \bar{v} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \bar{\chi} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \sigma E^2 - \psi, \quad (3)$$

где T — осредненная температура плазмы; $\bar{v} = (\rho v + \rho' v') / \rho$; v — осредненная радиальная скорость; ρ — осредненная плотность плазмы; ρ' , v' — пульсации плотности и радиальной скорости; u — осредненная аксиальная скорость плазмы;



p — давление; C_p — удельная теплоемкость плазмы при постоянном давлении; σ — удельная электропроводность плазмы; ψ — объемная плотность мощности собственного излучения; $\bar{\eta}$, $\bar{\chi}$ — полные коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности плазмы, представляющие собой суммы соответственно молекулярной и турбулентной вязкости и теплопроводности; E — осевая составляющая напряженности электрического поля; μ_0 — универсальная магнитная постоянная; H — азимутальная составляющая магнитного поля тока дуги:

$$H = \frac{1}{r} E \int_0^r \sigma r dr. \quad (4)$$

В рамках используемого приближения пограничного слоя осевая составляющая напряженности электрического поля дуги практически постоянна по сечению канала [10] и определяется из условия сохранения полного тока:

$$I = 2\pi E \int_0^{R_\sigma(z)} \sigma r dr, \quad (5)$$

где $R_\sigma(z)$ — радиус токопроводящей области. Учитывая, что за пределами этой области проводимость плазмы практически равна нулю, в качестве верхнего предела интегрирования в формуле (5) можно использовать радиус расчетной области, т. е. положить $R_\sigma(z) = R_C$ при $0 \leq z \leq Z_C$; $R_\sigma(z) = R_1$ при $Z_C < z \leq Z_1$; $R_\sigma(z) = R_2$ при $Z_1 < z \leq Z_2$ и $R_\sigma(z) = R_3$ при $Z_2 < z \leq Z_3$ (см. рис. 1).

Распределение давления в пределах плазмформирующего канала определяется с учетом магнитной составляющей давления:

$$p = p_{ext} - \int_Z^{Z_3} \frac{dp_C}{dz} + \mu_0 E \int_r^{R_C} \sigma H dr, \quad (6)$$

где p_{ext} — давление во внешней среде. Градиент газостатического давления dp_C/dz в приближении пограничного слоя также постоянен по сечению канала [9] и определяется из условия сохранения полного расхода газа через плазмотрон:

на участке течения в катодном канале ($z \leq Z_C$)

$$G_1 = 2\pi \int_0^{R_C} \rho u r dr; \quad (7)$$

на участке течения $Z_C < z \leq Z_3$

$$G_1 + G_2 = 2\pi \int_0^{R_w(z)} \rho u r dr, \quad (8)$$

где $R_w(z)$ — радиус канала плазмотрона, равный R_1 при $Z_C < z \leq Z_1$; $R_w(z) = R_2$ при $Z_1 < z \leq Z_2$ и $R_w(z) = R_3$ при $Z_2 < z \leq Z_3$.

Система уравнений (1)–(8) дополняется соотношениями

$$\begin{aligned} \rho &= \rho(T, p); \quad C_p = C_p(T, p); \quad \chi = \chi(T, p); \quad \eta = \eta(T, p); \\ \sigma &= \sigma(T, p); \quad \psi = \psi(T, p), \end{aligned} \quad (9)$$

определяющими зависимость термодинамических характеристик, молекулярных коэффициентов переноса и оптических свойств плазмы от температуры и давления. Некоторые значения параметров, используемых при расчетах плазмобразующих газов, например, аргона и воздуха, приведены в [10, 13]. Что касается термодинамических свойств и молекулярных коэффициентов переноса плазмы и молекулярного пара, то эти данные взяты из работ [14, 15]. Соответствующие свойства плазмы воздуха и водяного пара в диапазоне 400...24000 К (при атмосферном давлении) представлены на рис. 2.

Моделирование турбулентности. Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности плазмы, используемые в приведенных выше уравнениях, имеют вид

$$\bar{\eta} = \eta + \eta_t; \quad \bar{\chi} = \chi + \chi_t \quad (10)$$

где η , χ — коэффициенты молекулярной вязкости, определяемые согласно (9); η_t , χ_t — коэффициенты турбулентной вязкости и теплопроводности.

Для определения турбулентных коэффициентов переноса нами использована модель k - ϵ [16], которая в последнее время получила широкое распространение в практике моделирования турбулентных течений. К ее отличительным особенностям можно отнести учет предыстории течения, а также общность модели для различных условий течения.

В рамках данной модели коэффициенты турбулентной вязкости и теплопроводности определяются из следующих выражений:

$$\eta_t = \frac{C_\mu \rho (\bar{k})^2}{\epsilon}; \quad (11)$$

$$\chi_t = \eta_t \frac{C_p}{Pr_t}, \quad (12)$$

где C_μ — эмпирическая константа, равная 0,09; \bar{k} — кинетическая энергия турбулентности; ϵ — скорость диссипации турбулентности; Pr_t — турбулентное число Прандтля, которое выбирается согласно рекомендациям [17] или принимается равным единице [10]. Уравнение турбулентной вязкости замыкается уравнениями переноса для

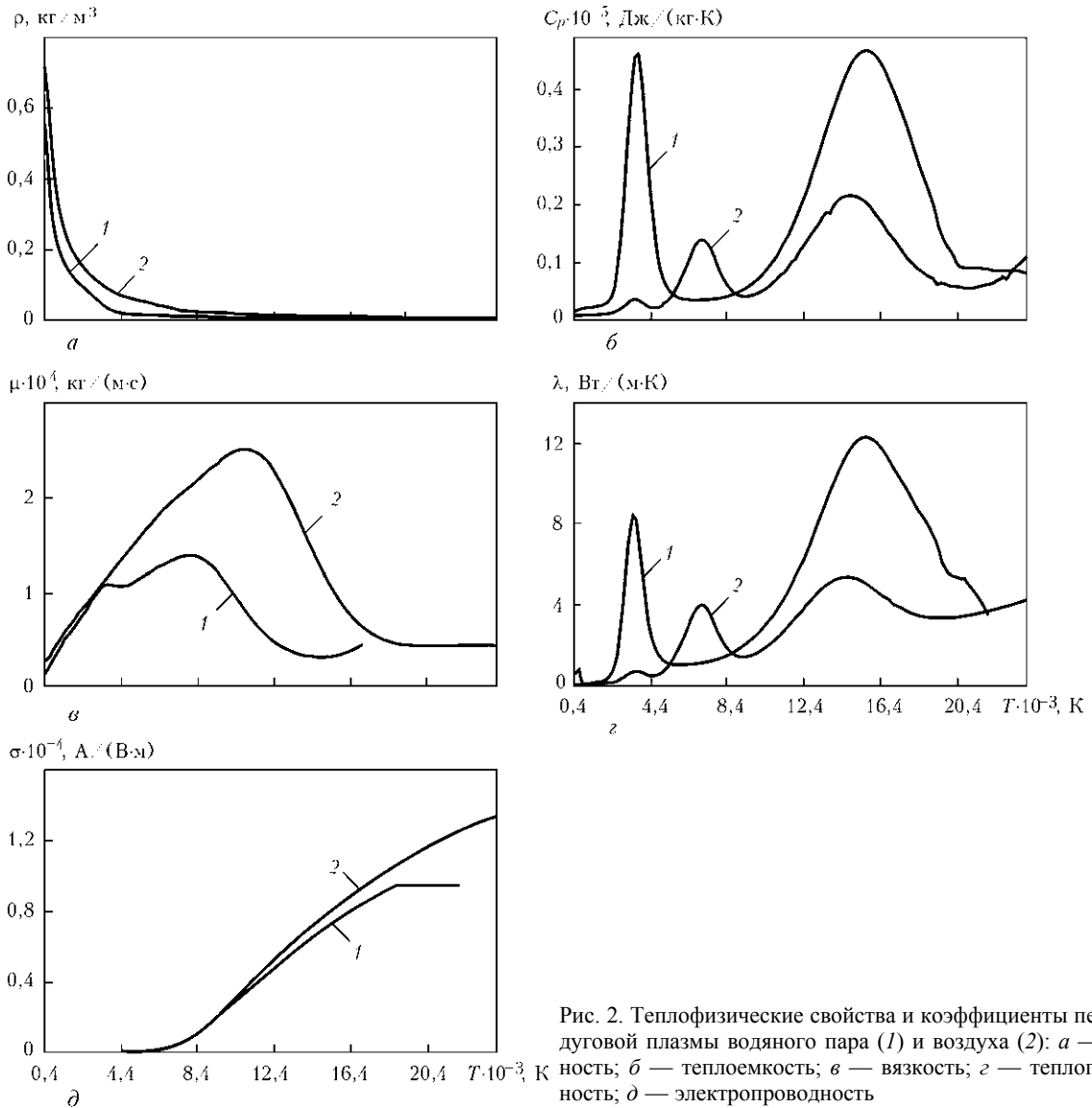


Рис. 2. Теплофизические свойства и коэффициенты переноса дуговой плазмы водяного пара (1) и воздуха (2): а — плотность; б — теплоемкость; в — вязкость; г — теплопроводность; д — электропроводность

кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации

$$\rho \left(u \frac{\partial \bar{k}}{\partial z} + \bar{v} \frac{\partial \bar{k}}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\eta + \frac{\eta_T}{Pr_k} \right) \frac{\partial \bar{k}}{\partial r} \right] + G - \rho \varepsilon; \quad (13)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + \bar{v} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\eta + \frac{\eta_T}{Pr_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right] + C_1 G \frac{\varepsilon}{\bar{k}} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{\bar{k}}. \quad (14)$$

Здесь $G = \eta_t \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2$ — источник член; $C_1, C_2, Pr_\varepsilon, Pr_k$ — константы модели турбулентности $k - \varepsilon$, равные соответственно 1,44; 1,92; 1,30 и 1,00.

Выражения для турбулентных коэффициентов переноса на инерционном участке течения плазмы при $z > Z_A$ остаются теми же, что и на дуговом участке.

Граничные условия. Для замыкания описанной системы уравнений необходимо задать граничные и начальные (входные) условия, соответ-

ствующие конструкции выбранного плазматрона (см. рис. 1).

На оси симметрии системы ($r = 0$) полагались справедливыми условия

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial r} = 0; \quad \bar{v} = 0; \quad \frac{\partial \bar{k}}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = 0. \quad (15)$$

На стенке канала плазматрона (при $r = R_w(z)$) ставится условие «прилипания» и задается температура охлаждаемой стенки T_w , т. е.

$$u = 0; \quad T = T_w. \quad (16)$$

Для задания значений \bar{k} и ε вблизи стенки канала необходимо использовать пристеночную функцию [16, 18], указанные значения определяются следующим образом:

$$\bar{k} = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}}; \quad \varepsilon = \frac{u_*^3}{k_0(R_C - r)}, \quad (17)$$



где $k_0 = 0,41$, а u_* является решением трансцендентного уравнения (логарифмический закон стенки):

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k_0} \ln \left[\frac{\Lambda \rho u_* (R_C - r)}{\eta} \right], \quad (18)$$

где $\Lambda = 9$ — параметр шероховатости стенки.

Для корректного учета вязкого подслоя при определении \bar{k} и ε в пристеночной области, т. е. при $y^+ = \rho(R_C - r)u_*/\eta < f^+$, где f^+ выбирается в диапазоне 20...100 [18], используются выражения (17), (18). Для описания внутренней области течения ($y^+ \leq f^+$) используются уравнения (13), (14) полностью развитого турбулентного течения.

Во входном сечении катодного канала ($z = 0$) задаются распределения скорости плазмообразующего газа, значения \bar{k} и ε [16], а также плотности тока в прикатодной области [19]:

$$u(r, 0) = u_0 \left[1 - \left(\frac{r}{R_C} \right)^n \right]; \quad (19)$$

$$\bar{k}(r, 0) = i_t(u^2 + \bar{v}^2); \quad \varepsilon(r, 0) = 3 \frac{\bar{k}(r, 0)^{3/2}}{R_C}; \quad (20)$$

$$j(r, 0) = j_0 e^{-r/r_c}, \quad (21)$$

где $n = 15$, а значение u_0 выбирается из условия сохранения массового расхода плазмообразующего газа через канал катодного сопла плазмотрона (7); $i_t = 0,003$ — интенсивность турбулентности; j — плотность электрического тока; j_0 — константа, соответствующая максимальному значению плотности тока в катодной области; r_c — радиус катодной области привязки дуги. В частности, при $I = 200$ А можно использовать значение $j_{0C} = 1,2 \cdot 10^8$ А/м² [19], а радиус катодной области определять из условия сохранения полного тока (5) и закона Ома

$$j = \sigma E. \quad (22)$$

Температура плазмообразующего газа во входном сечении катодного канала выбирается исходя из эмпирической зависимости плотности тока в области катода (21) с использованием зависимости $\sigma = \sigma(T, p)$ и соотношения (22). При этом напряженность электрического поля E при $z = 0$ полагается независимой от координаты r и соответствующей j_0 и $\sigma(T_C)$, где T_C — максимальная температура плазмы вблизи поверхности катода, определяемая по литературным данным [19] или экспериментально.

При определении распределений температуры и скорости основного

плазмообразующего газа, поступающего в рабочий канал плазмотрона через соосный кольцевой канал $R_C \leq r \leq R_1$ в сечении $z = Z_C$, исходим из условий, что в канал плазмотрона истекает однородный изотермический поток газа с температурой, равной температуре T_w стенки. Тогда при $R_C \leq r \leq R_1$ и $z = Z_C$ получим

$$T(r, Z_C) = T_w; \quad u(r, Z_C) = u_2 \equiv \frac{G_2}{\rho_2(R_1^2 - R_C^2)}, \quad (23)$$

где ρ_2 — плотность основного плазмообразующего газа, подаваемого в плазмформирующий канал.

Граничные условия для \bar{k} и ε на выходе из кольцевого канала для подачи основного плазмообразующего газа выбираются по аналогичным (20) зависимостям в соответствии с условием (23).

Результаты компьютерного моделирования. Поставленная задача решалась численно методом конечных разностей [20, 21]. Использовалась основная разностная схема для интегрирования систем уравнений типа уравнений пограничного слоя [22]. Дифференциальные уравнения второго порядка (2), (3), (12), (13) аппроксимировались по неявной двухслойной шеститочечной разностной схеме, а уравнение первого порядка (1) — по явной четырехточечной. Полученная алгебраическая система разностных уравнений решалась методом прогонки с применением последовательных итераций по z , наряду с которыми использовались глобальные итерации по давлению.

На основе описанной выше модели, алгоритмов и методов численного решения используемых дифференциальных уравнений разработано программное обеспечение ASPlasma (рис. 3), с помощью которого можно рассчитывать и отображать ключевые характеристики протекающих процессов, включая пространственные распреде-

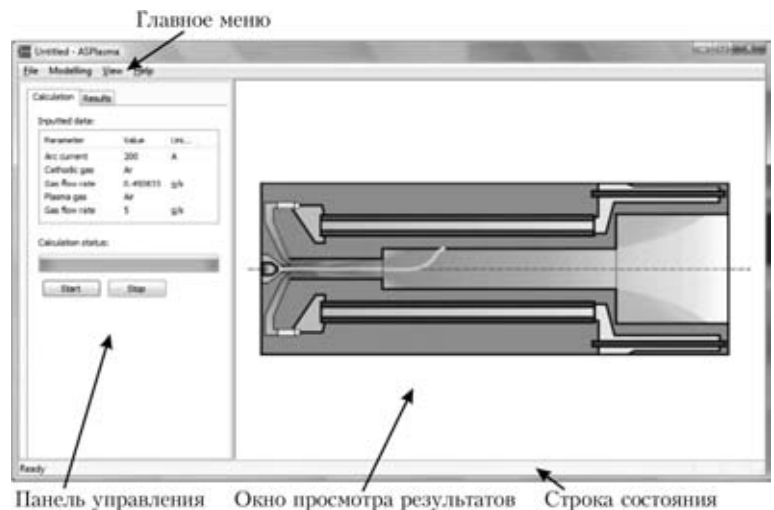


Рис. 3. Главное окно программного комплекса ASPlasma



ления скорости и температуры плазмы, электрические и энергетические характеристики дугового разряда в зависимости от режима работы исследуемого плазмотрона.

С использованием ASPlasma проведен детальный численный анализ тепловых, газодинамических и электромагнитных характеристик плазмы в рассматриваемом плазмотроне (см. рис. 1). Расчет распределенных и интегральных характеристик дуговой плазмы проводили при следующих значениях геометрических параметров канала катодного сопла и плазмформирующего канала плазмотрона: $R_C = 1,5$ мм; $R_1 = 4$ мм; $R_2 = 8$ мм; $R_3 = 22,5$ мм; $Z_C = 3$ мм; $Z_1 = 53$ мм; $Z_2 = 178$ мм; $Z_3 = 238$ мм при длине дуги $Z_A = 78...103$ мм.

Следует отметить, что длина дуги в используемой модели является внешним параметром, для определения которого необходимо привлечение экспериментальных данных в виде вольт-амперных характеристик дуги, горящей в рассматриваемом плазмотроне.

При проведении всех расчетов параметры режима работы плазмотрона выбирали соответствующими реальным диапазонам режимов работы таких плазмотронов, например, в установке для высокотемпературного плазменного пиролиза отходов: ток дуги $I = 100...400$ А; расход плазмообразующего газа, используемого для защиты катода (аргона), $G_1 = 0,45$ г/с ($1 \text{ м}^3/\text{ч}$); массовый расход основного плазмообразующего газа (воздуха или водяного пара) $G_2 = 2...10$ г/с; давление на выходе канала плазмотрона атмосферное. Начальная температура основного плазмообразующего газа (воздуха или водяного пара), подаваемого в канал, соответствует температуре стенок плазмформирующего канала плазмотрона и принимается равной 400 К.

На рис. 4–7 представлены распределенные и интегральные характеристики турбулентного течения дуговой плазмы воздуха и водяного пара в канале рассматриваемого плазмотрона при $Z_A = 78$ мм. В частности, на рис. 4 изображены аксиальные зависимости осевых значений температуры и скорости плазмы, а также показано распределение давления по длине канала при токе дуги $I = 200$ А и расходе основного плазмообразующего газа $G_2 = 5$ г/с. На рис. 5 представлены радиальные распределения температуры и аксиальной компоненты скорости плазмы в характерных сечениях канала плазмотрона при тех же значениях тока дуги и массового расхода плазмообразующего газа.

Как следует из расчетных данных, приведенных на этих рисунках, на начальном участке электрической дуги в рассматриваемом плазмотроне происходит существенное снижение температуры дуговой плазмы от 25000 К (рис. 4, а и кривую 1 на рис. 5, а, б), что характерно для выходного сечения катодного канала, до приблизительно 14000 К (рис. 4, а и кривую 2 на рис. 5, а, б) в выходном сечении первого участка плазмформирующего канала ($z = Z_1$). Это связано с интенсивным отбором энергии у центрального высокотемпературного потока аргоновой плазмы более холодным основным плазмообразующим газом (воздухом или водяным паром), который, кроме всего прочего, имеет и более высокую теплоемкость (см. рис. 2). При $z \geq Z_A$, т. е. при переходе к бестоковому участку течения, происходит еще одно достаточно резкое снижение температуры плазмы, вплоть до приблизительно 7000 К для воздуха и 4000 К для водяного пара (см. рис. 4, а и кривую 3 на рис. 5, а, б), на

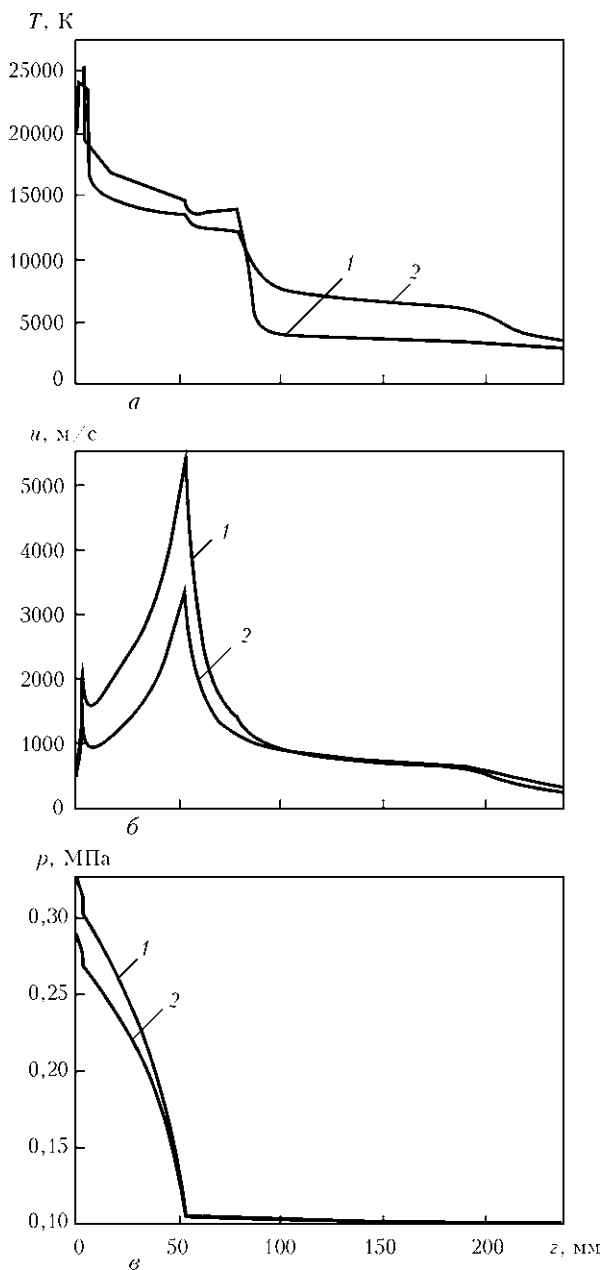


Рис. 4. Распределение осевых значений температуры (а), скорости (б) плазмы, давления (в) по длине канала при $I = 200$ А, $G_2 = 5$ г/с: 1 — водяной пар; 2 — воздух

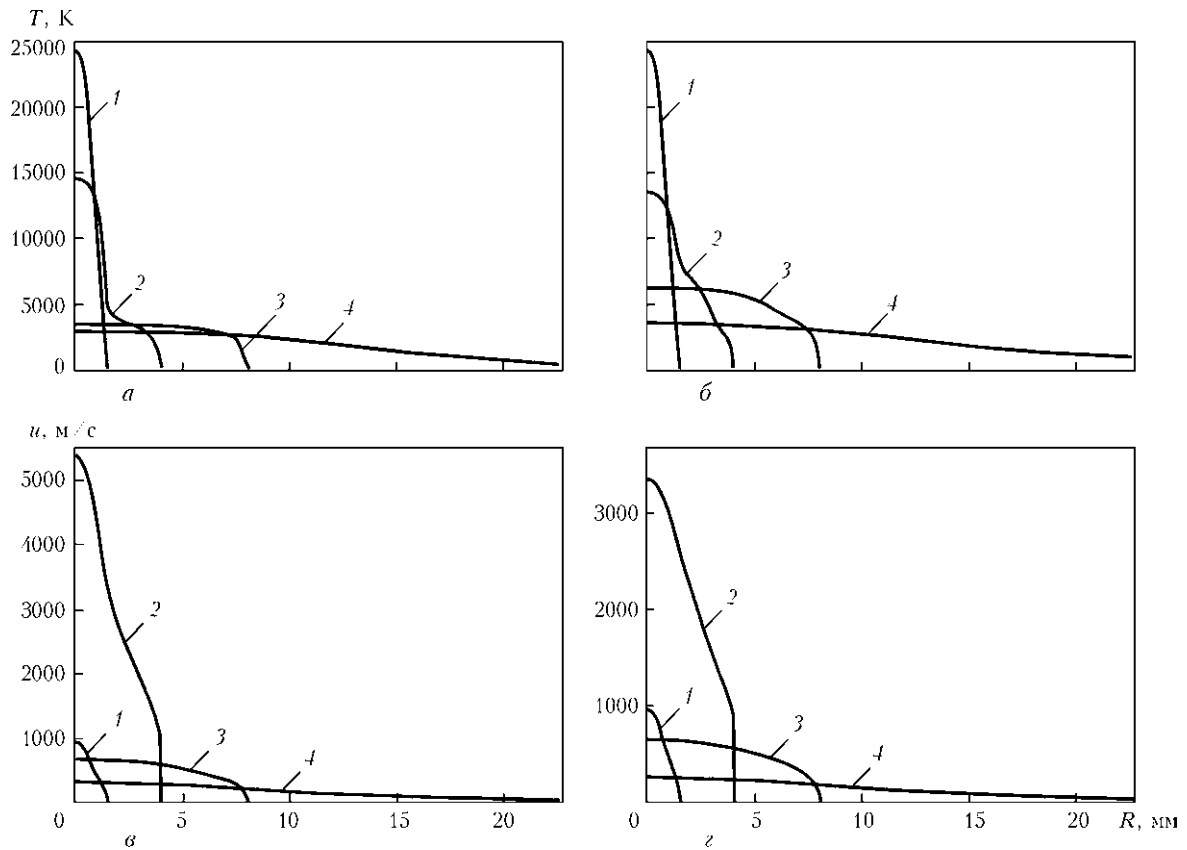


Рис. 5. Радиальные распределения температуры (а, б), скорости (в, г) плазмы водяного пара (а, в) и воздуха (б, г) в различных сечениях плазмформирующего канала: 1 — $z = Z_C$; 2 — $z = Z_1$; 3 — $z = Z_2$; 4 — $z = Z_3$

выходе второго (анодного) участка канала ($z = Z_2$), что связано с исчезновением здесь основного источника тепла в плазме — джоулева тепловыделения.

Скорость плазмы по оси канала вначале падает (см. рис. 4, б), что связано с торможением осевого потока аргоновой плазмы более медленным коаксиальным потоком основного плазмообразующего газа, подаваемого в плазмформирующий канал на этом участке. Затем она достаточно быстро возрастает, достигая значений свыше 3000 м/с для воздуха и 5000 м/с для водяного пара (см. рис. 4, б и кривую 2 на рис. 5, в, г), что обусловлено большим расходом основного плазмообразующего газа и его постепенным прогревом электрической дугой. При этом пристеночный кольцевой поток более холодного плазмообразующего газа будет препятствовать расширению осевого плазменного потока, истекающего из катодного сопла [12], поэтому на начальном этапе их взаимодействия ядро плазменного потока расширяется незначительно. Таким образом, область $Z_C \leq z \leq Z_1$ представляет собой достаточно сложный участок течения, характеризующийся постепенным вовлечением холодного газа в поток дуговой плазмы за счет процессов обмена импульсом и энергией между различными зонами течения.

За первым уступом плазмформирующего канала ($z \geq Z_1$) скорость дуговой плазмы падает вследствие существенного увеличения площади его поперечного сечения, снижаясь до значений 600...700 м/с на выходе анодного участка канала ($z = Z_2$).

Давление в рассматриваемом плазмотроне заметно падает только на участке катодного сопла и первом участке плазмформирующего канала, оставаясь далее практически постоянным (см. рис. 4, в), что связано с малым газодинамическим сопротивлением второго (анодного) участка и выходного насадка плазмотрона.

Как видно, пространственные распределения характеристик плазмы водяного пара в рассматриваемом плазмотроне качественно повторяют соответствующие распределения для воздушной плазмы. Что касается количественных отличий, то следует отметить, что при прочих равных условиях ($I = 200$ А, $G_2 = 5$ г/с) температура плазмы водяного пара на выходе второго (анодного) участка плазмформирующего канала оказывается несколько ниже соответствующей температуры воздушной плазмы, что, по всей вероятности, связано с большей по сравнению с воздухом теплоемкостью пара. И наоборот, скорость плазмы водяного пара оказывается несколько выше, что можно объяснить его меньшей плотностью. Более



высоким также оказывается и перепад давлений по длине канала.

На рис. 6 приведены расчетные зависимости интегральных характеристик плазмотрона от тока дуги и расхода основного плазмообразующего газа (воздуха или водяного пара). Как следует из рис. 6, *а*, расчетная вольт-амперная характеристика дуги в рассматриваемом плазмотроне является падающей, тогда как зависимость напряжения на дуге от расхода плазмообразующего газа при постоянном токе дуги имеет возрастающий характер (рис. 7, *а*). Значение КПД плазмотрона в малой степени зависит от изменения тока дуги (рис. 6, *в*), а при увеличении расхода плазмообразующего газа существенно возрастает (рис. 7, *в*). И наконец, расчетная электрическая мощность плазмотрона практически линейно возрастет при

увеличении как тока дуги (рис. 6, *б*), так и расхода основного плазмообразующего газа (рис. 7, *б*).

Полученные расчетные данные свидетельствуют о существенном влиянии рода основного плазмообразующего газа (воздуха или водяного пара) и параметров режима работы плазмотрона (тока дуги и расхода плазмообразующего газа) на электрические и энергетические характеристики плазмотрона, а также тепловые и газодинамические характеристики генерируемого им плазменного потока. В частности, при работе на воздухе ($G_2 = 5$ г/с) среднemasсовая температура и максимальная скорость генерируемого плазменного потока на выходе плазмотрона изменяются от 4243 К и 416 м/с ($I = 100$ А) до 6572 К и 985 м/с ($I = 400$ А) и соответственно при $I = 200$ А — от 6175 К и 398 м/с ($G_2 = 2$ г/с) до 4823 К и 853 м/с ($G_2 = 10$ г/с). При работе на

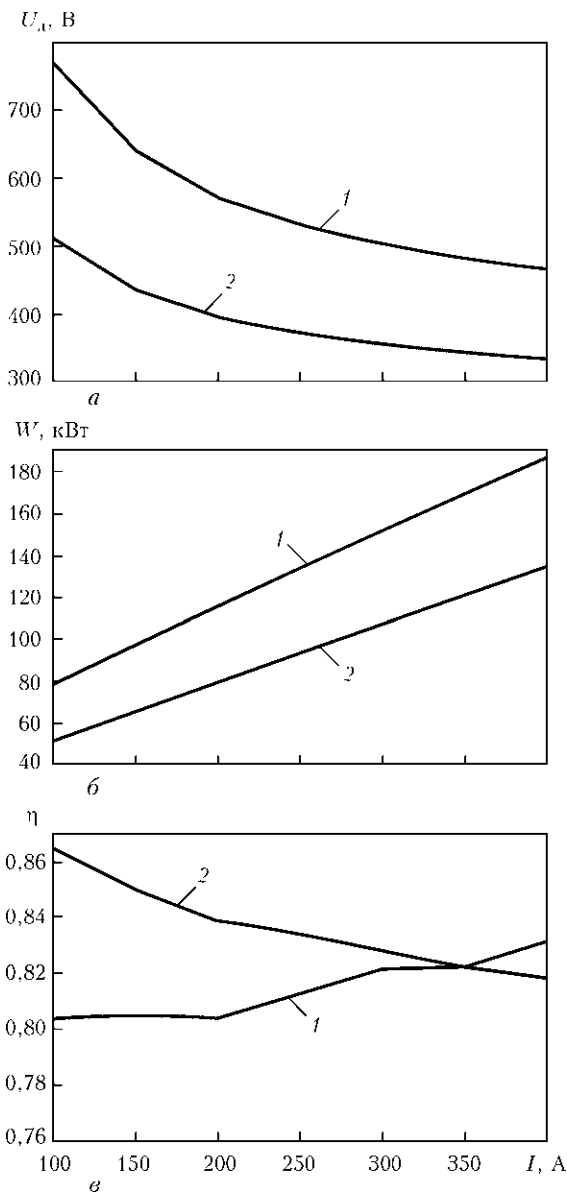


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика (*а*), зависимость электрической мощности плазмотрона (*б*) и его КПД (*в*) от тока дуги при $G_2 = 5$ г/с; 1, 2 — см. рис. 4

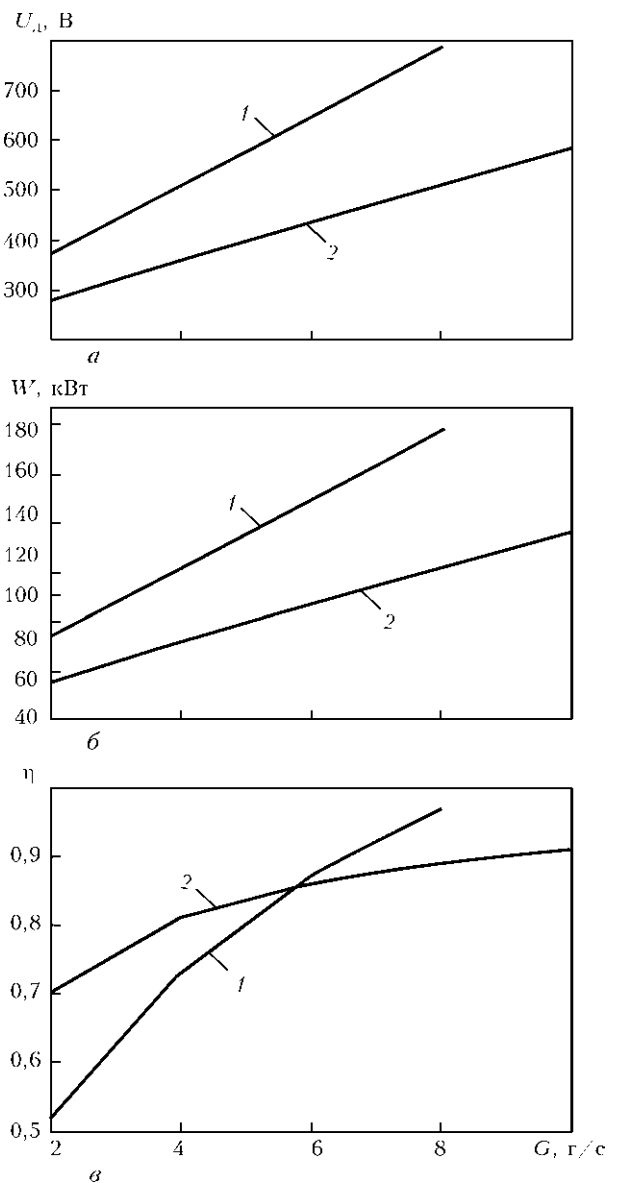


Рис. 7. Зависимость напряжения на дуге (*а*), электрической мощности плазмотрона (*б*) и его КПД (*в*) от расхода плазмообразующего газа при $I = 200$ А; 1, 2 — см. рис. 4



водяном паре ($G_2 = 5$ г/с) значения указанных величин изменяются от 3025 К и 509 м/с ($I = 100$ А) до 3550 К и 973 м/с ($I = 400$ А), а при $I = 200$ А — от 3195 К и 358 м/с ($G_2 = 2$ г/с) до 3280 К и 951 м/с ($G_2 = 8$ г/с).

Выводы

1. Разработанная математическая модель физических процессов, протекающих в паровоздушных плазматронах с тугоплавким катодом, применяемых, в частности, в плазматронах установки для высокотемпературного (плазменного) пиролиза медицинских и других опасных отходов, позволяет проводить численный анализ распределенных и интегральных характеристик потока дуговой плазмы, генерируемой плазматроном, в широких диапазонах изменения тока дуги и расхода плазмообразующего газа, в качестве которого может использоваться воздух или водяной пар. Для компьютерной реализации данной модели создано программное обеспечение с графическим интерфейсом, которое может использоваться для выбора оптимальных параметров режима работы плазматрона и дальнейшего совершенствования его конструкции.

2. Результаты численного исследования характеристик дуговой плазмы в рассматриваемом плазматроне показали существенное влияние рода плазмообразующего газа на электрические и энергетические характеристики дуги, а также на тепловые и газодинамические характеристики генерируемого потока плазмы. В частности, напряжение на дуге, а следовательно, мощность плазматрона, работающего на водяном паре, при прочих равных условиях оказываются существенно выше, чем при работе на воздухе. При этом среднемаховая температура плазмы водяного пара в выходном сечении плазматрона ниже соответствующей температуры воздушной плазмы, а скорость плазмы водяного пара, напротив, выше, что связано с особенностями теплофизических свойств и коэффициентов переноса рассматриваемых плазмообразующих газов.

1. *Non-incineration* medical waste treatment technologies. A resource for hospital administrators, facility managers, health care professionals, environmental advocates and community members / Health care without harm. — August, 2001. — www.noharm.org.
2. *Pat. 5534659, USA, A 62 D 3/00*. Apparatus and method for treating hazardous waste / M. D. Springer, T. Barkley, W.C. Burns. — Publ. 09.07.96.

3. PEAT International. — <http://www.peat.com>.
4. Startech Environmental Corp. — <http://www.startech.net>.
5. *Перспективы* применения плазменных технологий для уничтожения и переработки медицинских и других опасных отходов / Б. Е. Патон, А. В. Чернец, Г. С. Маринский и др. // Современ. электрометаллургия. — 2005. — № 3. Ч. I. — С. 54–63; № 4. Ч. II. — С. 52–60. — С. 52–60.
6. *Применение* пароплазменного процесса для пиролиза органических, в том числе медицинских и других опасных отходов / С. В. Петров, Г. С. Маринский, А. В. Чернец и др. // Там же. — 2006. — № 2. — С. 61–65.
7. *Пароплазменная* технология переработки опасных органических отходов / С. В. Петров, В. Н. Коржик, Г. С. Маринский и др. // Тез. докл. VII Междунар. науч.-техн. конф. «Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии», г. Гродно, Беларусь, 27–28 сент. 2007 г. — С. 20–22.
8. *Electric arc steam plasma conversion of medicine waste and carbon containing materials* / С. В. Петров, В. Н. Коржик, Г. С. Маринский и др. // Proc. of the XVII Intern. conf. on gas discharges and their applications, Cardiff, Wales, Sept. 7–12, 2008. — Cardiff: Cardiff University, 2008. — P. 465–468.
9. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа. — М.: Наука, 1973. — 847 с.
10. *Теория столба* электрической дуги / Под ред. М. Ф. Жукова. — Новосибирск: Наука, 1990. — 376 с.
11. *Computer-aided simulation and experimental study of dusted plasma jets emitting into limited space* / Yu. S. Borisov, A. V. Chernyshov, I. V. Krivtsov et al. // Proc. of the National thermal spray conf., Boston, USA, 20–24 June, 1994. — Boston, 1994. — P. 361–366.
12. *Математическая* модель дуговой плазмы, генерируемой плазматроном с проволокой-анодом / М. Ю. Харламов, И. В. Кривцун, В. Н. Коржик и др. // Автомат. сварка. — 2007. — № 12. — С. 14–20.
13. *Boulos M. I., Fauchais P., Pfender E.* Thermal plasmas: Fundamentals and applications. — New York; London: Plenum Press, 1994. — Vol. 1. — 467 p.
14. *Coufal O.* Composition and thermodynamic properties of thermal plasma up to 50 kK // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2007. — 40. — P. 3371–3385.
15. *Starshyk P. D., Porytsky P. V.* On the properties of the nonideal plasma of electrical pulse discharges in water // Problems of Atomic Sci. and Techn. — 2008. — № 6. — P. 207–209.
16. *Lauder B. E., Spalding D. B.* The numerical computation of turbulent flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Eng. — 1990. — № 8. — P. 269–289.
17. *Иевлев В. М.* Турбулентное движение высокотемпературных сплошных сред. — М.: Наука, 1975. — 254 с.
18. *Wilcox D. C.* Turbulence modeling for CFD. — Clendale, California: Griffin Printing, 1994. — 460 p.
19. *Приэлектродные* процессы в дуговых разрядах / М. Ф. Жуков, Н. П. Козлов, А. В. Пустогаров и др. — Новосибирск: Наука, 1982. — 157 с.
20. *Самарский А. А.* Введение в теорию разностных схем. — М.: Наука, 1971. — 552 с.
21. *Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р.* Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2 т. Т. 1. — М.: Мир, 1990. — 384 с.
22. *Пасконов В. М., Полежаев В. И., Чудов Л. А.* Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. — М.: Наука, 1984. — 286 с.

The mathematical model is presented, describing turbulent flow of the electric arc plasma in air-vapour plasmatrons with a refractory cathode. The effect of operating parameters of a plasmatron and kind of the employed plasma gas on electric and energy characteristics of the arc, as well as on thermal and gas-dynamic characteristics of the plasma flow generated by such a plasmatron has been numerically studied.

Поступила в редакцию 29.04.2009



МЕХАНИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ГАЗОВОГО ПОТОКА НА ПОВЕРХНОСТЬ СТенок КАНАЛА ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ГАЗОЛАЗЕРНОЙ РЕЗКЕ

И. В. ШУБА, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены особенности течения вспомогательного газа при газолазерной резке стальных пластин толщиной 10 мм. Установлено, что распределение касательных напряжений на поверхности расплава зависит от положения оси газовой струи относительно входной грани канала проплавления. Показана возможность обеспечения равномерного распределения касательных напряжений на поверхности расплава в широком диапазоне избыточного давления рабочего газа.

Ключевые слова: газолазерная резка, сталь, газовая струя, избыточное давление, канал проплавления, поверхность расплава, касательные напряжения

В настоящее время в промышленности широко используются технологические процессы, в которых задействовано лазерное излучение, в частности, в процессах газолазерной резки (ГЛР) и лазерной сварки. С помощью ГЛР не всегда удается получить изделия, которые могут быть использованы для последующей сварки в конструкции без дополнительной обработки кромок. В связи с этим существует необходимость минимизации или полного исключения факторов, которые приводят к образованию шероховатости на поверхности кромок или отклонению геометрии кромок изделия от заданных размеров. В процессе ГЛР для удаления расплава из зоны обработки используют газовую струю, которую с помощью сопла направляют внутрь канала проплавления (КП) — область, в пределах которой металл находится в жидком состоянии. В результате механического воздействия газового потока на поверхности расплава возникает сила, которая преодолевает силы поверхностного натяжения и вязкого трения. При этом масса расплава приобретает ускорение и перемещается в направлении движения газового потока. Таким образом, осуществляется процесс удаления металла из зоны обработки и формирование боковой кромки изделия. Основываясь на данных, приведенных в работах [1–3], можно выделить три группы факторов, которые определяют характер протекания процесса ГЛР и конечное качество изделий, полученных с помощью этого технологического процесса. Первая группа факторов связана с физическими свойствами обрабатываемого материала и их влиянием на его поведение под воздействием тепловых или механических нагрузок, а также характером протекания химических реак-

ций с его участием, вторая — со свойствами лазерного излучения, а также с условиями поглощения излучения в зоне обработки. Третья группа связана со свойствами рабочего газа, характером химического взаимодействия его с обрабатываемым материалом и продуктами его разрушения, а также газодинамическими параметрами в зоне обработки. В настоящее время нет единой теории, которая бы однозначно определяла взаимосвязь между перечисленными факторами и конечным качеством изделия. Поэтому целесообразно исследовать отдельные аспекты влияния различных технологических факторов на протекание процесса ГЛР.

Цель данной работы — поиск газодинамических условий и факторов, которые отрицательно влияют на эффективность удаления расплава из зоны обработки, а также поиск способов их устранения.

В рассматриваемом технологическом процессе в области, где происходит интенсивное взаимодействие газового потока, лазерного излучения и материала, газ движется внутри узкого длинного канала, на передней стенке которого находится слой жидкого расплава (рис. 1). В данной работе

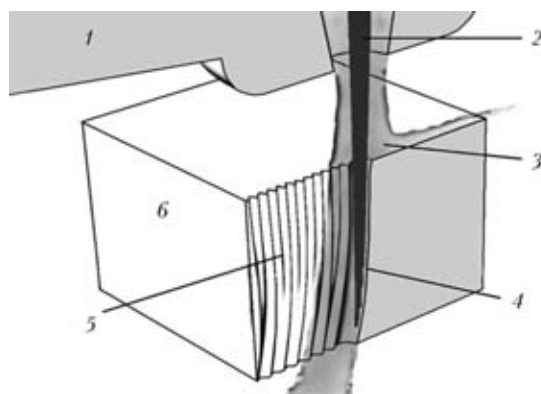


Рис. 1. Схематическое изображение процесса ГЛР: 1 — сопло; 2 — луч; 3 — газовая струя; 4 — передняя стенка канала проплавления; 5 — боковая стенка канала проплавления; 6 — пластина



рассматривается только механическое взаимодействие между газом и расплавом, нормальное давление на поверхность раздела фаз определяется статическим давлением газа, а касательное — динамическим давлением потока, которое зависит от скорости газа. При совместном движении газа и жидкости возникает механическое взаимодействие на границе раздела фаз, приводящее к изменению формы поверхности раздела, а также к образованию и эволюции динамических структур — стационарных или движущихся волн на поверхности расплава [2]. Если допустить, что фазовые превращения отсутствуют, то согласно работе [4] можно принять, что в таких условиях на границе раздела фаз совпадают тангенциальные и нормальные составляющие векторов напряжений и векторов скоростей фаз. Следовательно, если из газодинамического расчета известно распределение касательных и нормальных напряжений на граничных поверхностях расчетной области, то для тех граничных поверхностей расчетной области, которые соприкасаются с поверхностью твердого или жидкого тела, полученные данные можно рассматривать как значения касательных и нормальных напряжений на поверхности этого тела, т. е. в нашем случае на поверхности стенок КП.

Для исследования газодинамических аспектов процесса ГЛР с помощью пакета геометрического моделирования Rhinoceros [5] были созданы две расчетные области, форма которых соответствует расположению сопла газолазерного резака на расстоянии 1 мм от поверхности пластины толщиной 10 мм, имеющей сквозной плоский щелевой канал шириной 0,4 мм с параллельными стенками (рис. 2). Длина участка соплового канала 30 мм. Профиль соплового участка — конический с цилиндрическим выходным участком длиной 1 мм, угол между стенками 30°. Диаметр выходного отверстия сопла 1,2 мм, длина канала проплавления (толщина пластины) 10 мм. Граничная поверхность, которая представляла собой переднюю стенку КП, была смоделирована как боковая поверхность цилиндра, рассеченного пополам вдоль оси. Предполагалось, что положение этой граничной поверхности относительно оси сопла соответствует эффективному радиусу лазерного пучка, который в обоих случаях равен 0,2 мм. Первая расчетная область соответствует типичному способу установки оси сопла относительно оси лазерного пучка, при котором их располагают вдоль одной линии для обеспечения равных условий поступления тепловой энергии излучения в объем материала при изменении направления перемещения во время обработки (положение *A*). Для такой схемы расположения расстояние между передней стенкой канала проплавления и осью сопла составило 0,2 мм. Вторая расчетная область соответствует расположению оси лазерного пучка со

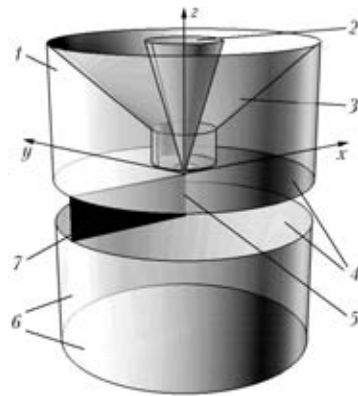


Рис. 2. Схематическое изображение расчетной области: 1, 6 — поверхности, через которые газ поступает в окружающую атмосферу; 2 — вход в сопловой канал резака; 3 — внешняя поверхность соплового канала; 4 — верхняя и нижняя поверхность разрезаемой пластины; 5 — передняя стенка щелевого канала в пластине; 7 — боковые стенки плоского щелевого канала в пластине

смещением 0,15 мм относительно оси сопла в направлении движения лазерного резака (положение *B*), поэтому расстояние между передней стенкой канала проплавления и осью сопла составляло 0,35 мм. Для всех граничных поверхностей расчетной области, которые представляли собой твердые стенки, скорость газа во всех узлах расчетной области, принадлежащих этим поверхностям была задана равной нулю (рис. 2, поз. 3–5, 7). Разбиение расчетной области на конечные элементы, задание граничных условий и расчет распределения газодинамических параметров проводили с помощью коммерческого пакета конечно-элементного моделирования Ansys CFX. После этого проводили численные расчеты распределения параметров газового потока для обеих схем подачи рабочего газа в зону обработки: без смещения оси сопла относительно оси луча и со смещением. Для каждой схемы проведена серия из пяти расчетов при значениях скорости потока на входе (рис. 2, поз. 2) в расчетную область от 1 до 5 м/с.

Для обоих расчетов не учитывались тепловые эффекты, только газодинамические. Не учитывалось поведение расплава как упругой структуры под воздействием теплового потока, поэтому не заданы и не определены в процессе расчета его свойства и характеристики. Характер воздействия газового потока на поверхность расплава определяли косвенно по значению таких параметров, как касательные напряжения на поверхности стенки КП и скорость газа на расстоянии 0,05 мм от поверхности стенок КП. Свойства материала расчетной области соответствовали свойствам воздуха при нормальных условиях.

Для получения данных, позволяющих косвенно оценить эффективность использования струи в качестве фактора, который воздействует на поверхность расплава в обоих вариантах расположения оси струи относительно входной грани КП, пост-

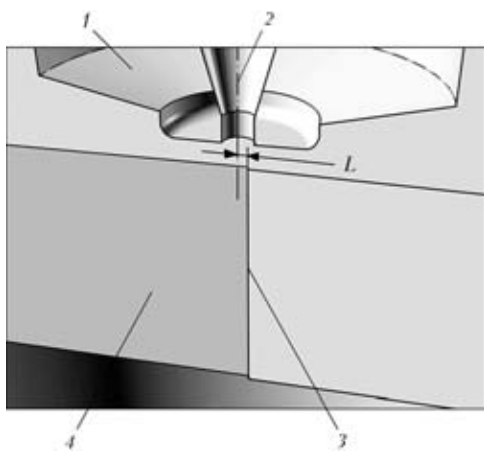


Рис. 3. Поперечное сечение расчетной области: 1 — сопло; 2 — ось симметрии сопла; 3, 4 — соответственно передняя и боковая стенка канала проплавления; L — расстояние между осью симметрии сопла и передней стенкой канала проплавления

роена линия, расположенная вдоль поверхности передней стенки КП (рис. 3, поз. 3). Затем для точек этой линии получены значения касательных напряжений и значения скорости газа в погранич-

ном слое на расстоянии 0,05 мм от стенки. В качестве примера на рис. 4 приведены изолинии распределения скорости внутри расчетной области для обоих положений и соответствующие им графики распределения касательного напряжения вдоль передней стенки КП для значения скорости газа на входе в сопловый канал – 5 м/с (соответствует давлению 7,2 атм рабочего газа в ресивере).

После этого построены графики распределения касательного напряжения на поверхности передней стенки КП и распределения скорости в пограничном слое вдоль всего канала для каждого расчетного значения скорости на входе в сопловый канал (рис. 5, 6). С точки зрения технолога или оператора лазерной установки избыточное давление внутри соплового канала является более информативным параметром технологического процесса, чем скорость на входе в сопло, так как этот параметр процесса можно легко контролировать (измерять) и регулировать (изменять), поэтому на графиках (рис. 5, 6) номера кривых распределения касательных напряжений и скорости

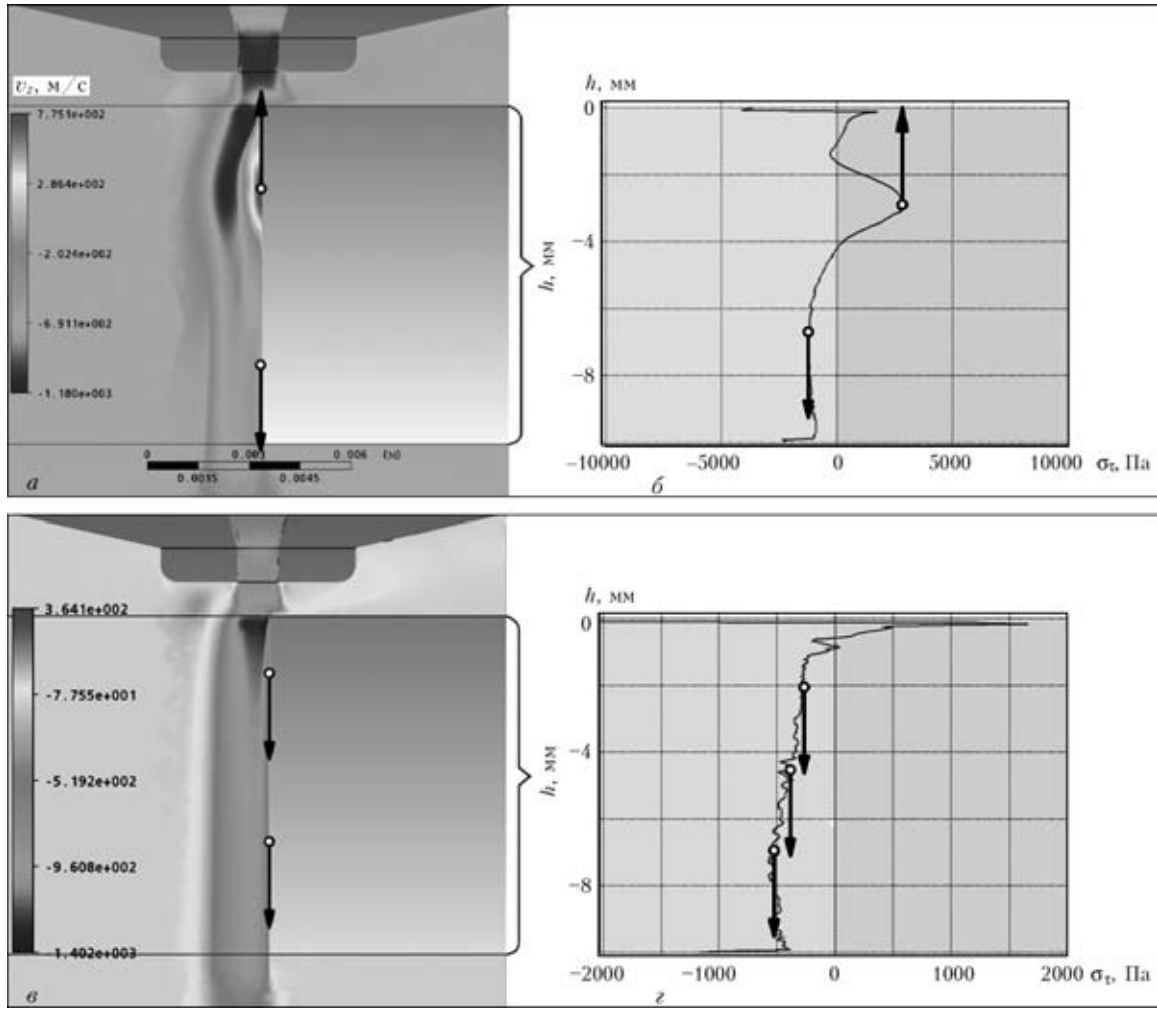


Рис. 4. Распределение скорости потока внутри канала проплавления при скорости газа на входе в сопловый канал 5 м/с для положения А (без смещения) (а), Б (со смещением) (б) и соответствующее этим условиям распределение касательных напряжений на передней стенке канала проплавления (в, г)

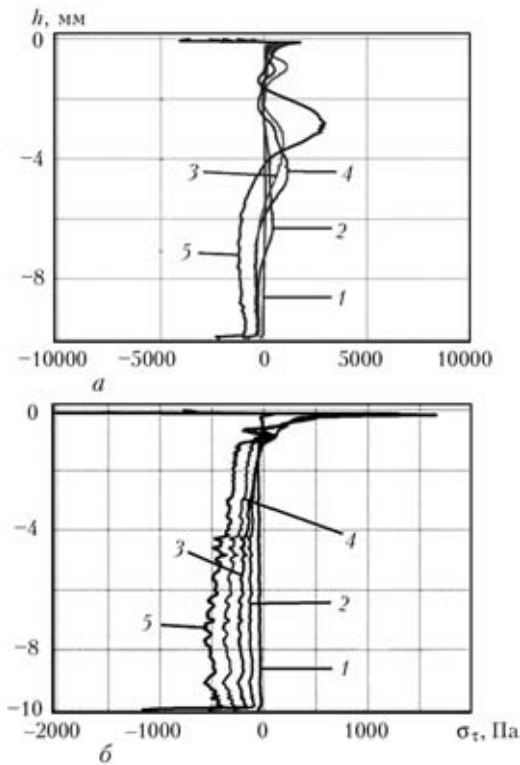


Рис. 5. Распределение z -компоненты касательных напряжений на передней стенке канала проплавления при различных значениях избыточного давления в ресивере для положения A (a) и B (b): 1 — 30; 2 — 117 (a), 116 (b); 3 — 260; 4 — 460; 5 — 725 (a); 714 кПа (b)

вдоль КП соответствуют расчетным значениям давления внутри соплового канала (таблица).

Результаты расчетов позволили выявить главное отличие между течением газа внутри канала в пластине в положении A и в положении B . Отклонение струи при натекании на входную грань КП приводит к отрыву пограничного слоя от пе-

Расчетные значения избыточного давления внутри соплового канала при различных значениях скорости газа на входе в сопловой канал

Номер расчета	Скорость на входе в сопловой канал $v_{вх}$, м/с	Давление в сопловом канале $P_{ресивер}$, Па
<i>Положение A (L = 0,1 мм)</i>		
1	1	30000
2	2	117500
3	3	260000
4	4	460000
5	5	725000
<i>Положение B (L = 0,35 мм)</i>		
6	1	30000
7	2	116000
8	3	260000
9	4	460000
10	5	714000

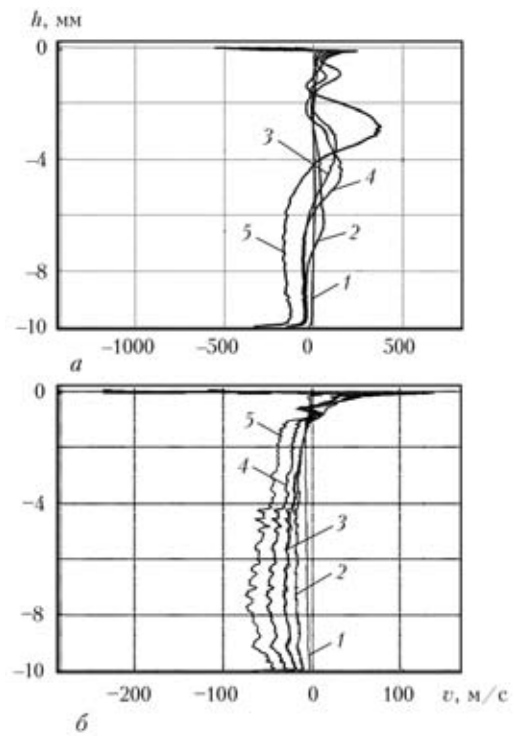


Рис. 6. Распределение z -компоненты на передней стенке канала проплавления при различных значениях избыточного давления в ресивере для положения A (a) и B (b): 1 — 30; 2 — 117 (a), 116 (b); 3 — 260; 4 — 460; 5 — 725 кПа

редней стенки КП и образованию застойного участка, в котором возникает вихревое течение. Сравнивая картины распределения скорости внутри КП (рис. 6) и соответствующие графики распределения касательного напряжения на передней стенке КП вдоль канала (рис. 5), можно видеть, что в положении A , когда поток струи значительно отклоняется на входе в канал, касательные напряжения на передней стенке канала несколько раз меняют знак. В положении B , напротив, значение касательных напряжений в целом нарастает вниз по потоку и не меняет знак при всех значениях избыточного давления в сопловом канале.

Причиной таких различий в распределении параметров для каждого из положений является то, что в первом случае часть газового потока, попадая внутрь канала, значительно отклоняется от прямолинейного движения при взаимодействии с входной гранью КП. В результате возникновения вихревой области значительная часть газового потока внутри канала не соприкасается с передней стенкой канала и не обеспечивает механическое воздействие на поверхность стенок в направлении выхода из канала для удаления расплава из зоны обработки. Это предположение подтверждается картинами линий тока, которые построены для обоих положений оси сопла относительно передней стенки КП при избыточном давлении соплового потока в сопловом канале 260 кПа и показаны на рис. 7. Видно, что в положении A (рис. 7, a) вихревая область занимает значительный объем внутри

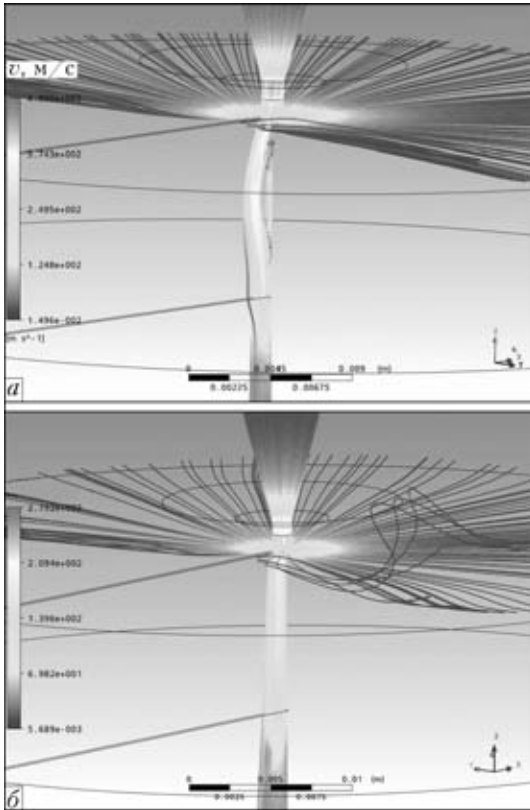


Рис. 7. Линии тока для положения оси сопла без смещения (а) и со смещением *Б* (б) относительно передней стенки канала проплавления при избыточном давлении рабочего газа внутри резака 260 кПа

канала и препятствует воздействию основного потока на поверхность передней стенки КП в отличие от положения *Б* (рис. 7, б). Сравнивая графики распределения касательного напряжения и скорости около стенки для всех начальных условий (см. рис. 5, б), видно, что для расчетной области в положении *А* тенденция к проявлению эффекта отрыва потока от поверхности канала с образованием вихревого течения около стенки проявляется для всех, даже самых низких значений избыточного давления внутри соплового канала, в то время как для расчетной области в положении *Б* заметны только локальные скачки в распределении полученных газодинамических параметров вдоль всей поверхности передней стенки канала проплавления.

Таким образом, для типичной схемы расположения оси сопла относительно оси лазерного пучка возникают условия, при которых силы,

действующие на поверхность стенок канала проплавления, на некоторых участках канала действуют в противоположных направлениях, что свидетельствует о дестабилизирующем воздействии на течение расплава со стороны газового потока. Сравнивая графики распределения касательных напряжений и скорости для двух схем подачи газа в зону обработки при одинаковых начальных условиях, можно видеть, что существует возможность такого распределения касательных напряжений вдоль канала, при котором обеспечивается однонаправленное действие механических сил со стороны газового потока на поверхность расплава. Для этого, например, можно сместить ось симметрии сопла по отношению к передней стенке канала проплавления таким образом, чтобы газовая струя при попадании внутрь канала как можно меньше отклонялась от прямолинейного направления течения. Таким образом, снижается вероятность образования застойных участков внутри канала и условия образования вихревого течения, которое негативно сказывается на равномерности распределения касательных напряжений на поверхности расплава. По нашему мнению, на практике это должно оказывать положительное влияние на стабилизацию течения расплава и приводить к улучшению геометрических характеристик боковой кромки изделий, полученных с помощью ГЛР.

Таким образом, взаимное расположение оси сопла и оси лазерного пучка, определяющего положение передней стенки канала проплавления, в процессе резки оказывает значительное влияние на распределение касательных напряжений на поверхности стенок канала проплавления, и может быть использовано как технологический параметр, управляющий течением расплава в процессе ГЛР для повышения качества вырезаемого изделия.

1. Steen W. M., Kamalu J. N. Laser cutting. — London Imperial College of Science and Technology, 1983. — 201 p.
2. Голубев В. С. Анализ моделей динамики глубокого проплавления материалов лазерным излучением: Сб. тр. ИПЛИТ РАН / Под ред. В. Я. Панченко и В. С. Голубева. — М.: Интерконтакт Наука, 2005. — С. 199–216.
3. Григорьянц А. Г., Соколов А. А. Лазерная резка металлов. Сер. Лазерная техника и технология: В 7 кн. — Кн. 7. — М.: Высш. шк., 1988. — 127 с.
4. Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. — Новосибирск: Наука, 1984. — 302 с.
5. <http://www.rhino3d.com>

The paper deals with the features of gas flow in laser cutting of 10 mm plates. It is established that distribution of tangential stresses on the melt surface depends on the relative position of the nozzle axis and front wall of the penetration channel. The possibility of ensuring a uniform distribution of tangential stresses on the melt surface in a broad range of working gas excess pressure is shown.

Поступила в редакцию 26.01.2009



СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТОКОМ ПУЧКА ПРЯМОНАКАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРОЧНОЙ ПУШКИ

Ю. Н. ЛАНКИН, д-р техн. наук, **Л. Ф. СУШИЙ**, **В. Ф. ШУЛЫМ**, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описана система автоматического управления током пучка прямонакальной электронно-лучевой сварочной пушки.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, прямонакальная пушка, автоматическое регулирование, ток пучка

Прямонакальные диодные электронно-лучевые пушки (ЭЛП) широко применяются в установках для электронно-лучевой сварки, плавления и нанесения покрытий. Регулирование и стабилизация тока электронного пучка в них осуществляется путем регулирования тока накала катода. В ЭЛП с косвенным нагревом катода электронной бомбардировкой узел генерирования электронного пучка бомбардировки фактически является встроенной малоамперной ЭЛП с прямонакальным катодом.

В литературе отсутствуют сведения о статических и динамических характеристиках прямонакальных ЭЛП с и без автоматического регулирования тока электронного пучка. Ниже описана система автоматического управления током пучка малоамперной прямонакальной ЭЛП, частично устраняющей этот пробел.

Ток электронного пучка диодных ЭЛП обычно регулируется путем изменения температуры катода. Для вольфрамового катода плотность тока эмиссии связана с температурой катода следующей зависимостью:

$$j_s = 37T^2 \exp[-47825T^{-1}].$$

Таким образом, ток пучка можно регулировать в широких пределах, изменяя мощность нагрева катода, который работает в режиме насыщения, т. е. все электроны, эмитируемые катодом, достигают анода. При большой плотности тока катода ток пучка ограничивается пространственным зарядом в межэлектродном промежутке и равен

$$I_n = kE_y^{3/2},$$

где k — коэффициент, зависящий от формы электродов и расстояния между ними; E_y — ускоряющее напряжение.

Статическая характеристика прямонакальной ЭЛП приведена на рис. 1. Как видно из рисунка, для данной ЭЛП при $I_n < 25$ мА катод работает в режиме насыщения и зависимость тока пучка от мощности нагрева носит экспоненциальный характер. Незначительные (6 %) изменения мощности накала вызывают существенные (25 %) изменения значений тока пучка. В связи с этим необходима автоматическая стабилизация тока пучка путем регулирования мощности нагрева катода. При $I_n > 25$ мА катод постепенно переходит в режим ограничения тока пространственным зарядом. Ширина промежуточной области зависит от неравномерности температуры катода по эмитирующей поверхности.

Из рис. 2 видно, что прямонакальная ЭЛП представляет собой аperiodическое звено первого порядка с постоянными времени 1,3 с при спаде и 0,94 с при нарастании тока пучка. Очень большая инерционность пушки весьма затрудняет программное управление электронным пучком, необходимое, например, при заварке кратера в конце процесса сварки. Это является еще одной причиной применения автоматического регулирования, поскольку отрицательная обратная связь значительно уменьшает время отработки изменения тока пучка.

На рис. 3 приведена принципиальная схема системы автоматического программного регулирования тока пучка прямонакальной диодной ЭЛП.

Регулятор осуществляет автоматическую стабилизацию заданного значения тока электронного

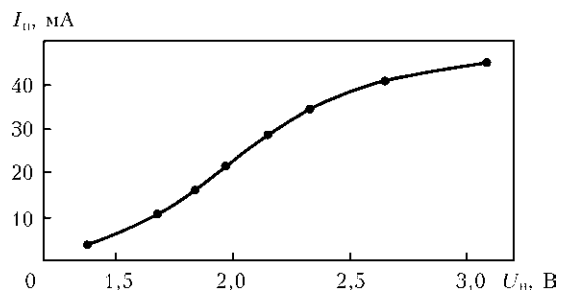


Рис. 1. Статическая характеристика прямонакальной ЭЛП (U_n — напряжение накала)



пучка ЭЛП путем регулирования тока накала пушки. При заварке кратера в конце процесса сварки осуществляется плавный спад тока с заданной скоростью.

Напряжение обратной связи, пропорциональное току пучка I_p , снимается с шунта $R8$, включенного между «землей» и положительным полюсом источника ускоряющего напряжения ИП. Это напряжение через резистор $R5$ подается на инвертирующий вход усилителя рассогласования $DA2$. Разрядник $FV1$, фильтр $R7-C6$ и стабилитрон $VD3$ защищают входные цепи регулятора от помех при высоковольтных пробоях в сварочной установке. На инвертирующий вход усилителя $DA2$ через резистор $R4$ подается программно изменяющееся задающее напряжение тока пучка U_{np} , которое снимается с потенциометра $R3$. Усиленная разность заданного и измеренного напряжения на выходе операционного усилителя $DA2$ подается на интегрирующую цепочку $R6-C3$. В результате напряжение на конденсаторе $C3$ линейно возрастает. Конденсатор $C3$ подключен к эмиттеру однопереходного транзистора $VT2$. При достижении напряжения на эмиттере напряжения отпирания транзистора $VT2$ конденсатор $C3$ быстро разряжается по цепи эмиттер Э – база $B1$ – излучающий диод оптосимистора $VD4$, в результате чего последний включается. После этого конденсатор $C3$ снова заряжается. Для синхронизации включения симистора с напряжением питающей сети транзистор $VT2$ принудительно включается транзистором $VT1$ каждый раз при переходе напряжения сети через нуль.

Катод ЭЛП питается выпрямленным напряжением высокопотенциального понижающего трансформатора $T1$. Первичная обмотка трансформатора подключена к питающей сети через оптоси-

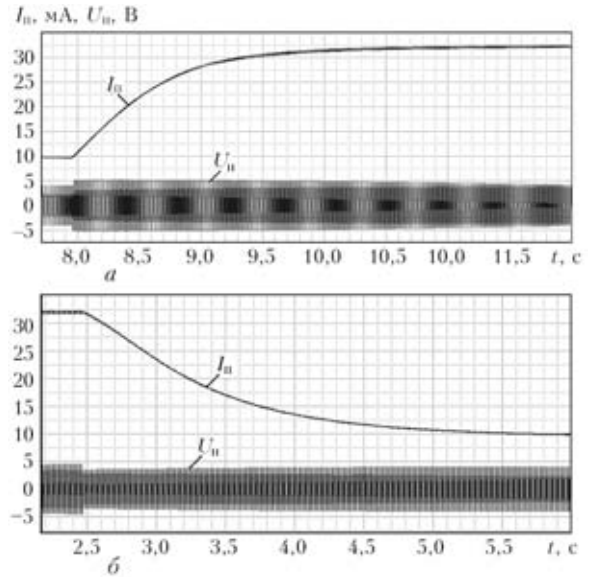


Рис. 2. Переходные функции прямонакальной ЭЛП: а — нарастание тока при скачкообразном увеличении напряжения накала; б — спад тока при скачкообразном уменьшении напряжения накала

мистор $VD4$. Благодаря фазовому регулированию включения симистора ток накала катода ЭЛП изменяется пропорционально напряжению задания.

Вследствие отрицательной обратной связи по току пучка значение тока ЭЛП всегда равно заданному независимо от любых возмущений, действующих на него — изменение эмитирующей способности катода, колебания напряжения сети и т. п. Кроме того, благодаря форсирующим свойствам отрицательной обратной связи существенно улучшаются динамические характеристики системы. Для примера на рис. 4 приведены осциллограммы переходных процессов при отработке системой ступенчатого изменения задания тока пучка.

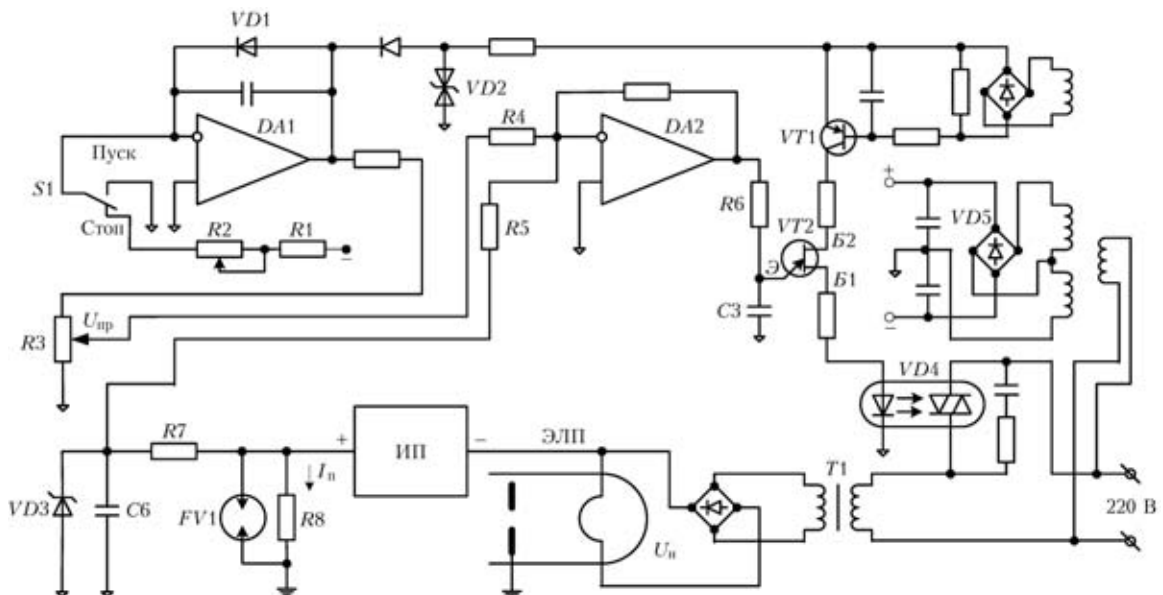


Рис. 3. Принципиальная схема программного регулятора тока прямонакальной диодной сварочной ЭЛП

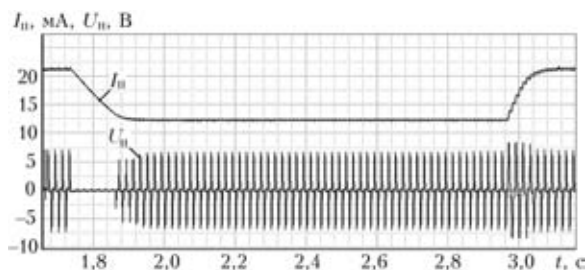


Рис. 4. Обработка регулятором ступенчатого изменения задания тока пучка

Как видно из рис. 4, время снижения тока пучка с 22 до 12 мА составляет 0,140 с, а время его увеличения — 0,075 с, что приблизительно на порядок быстрее, чем без обратной связи (см. рис. 2). Объясняется это тем, что почти на все время переходных процессов автоматически устанавливаются предельные значения управляющих воздействий — напряжение накала равно нулю или максимальное. В результате система отличается свойствами, приближающимися к свойствам оптимальной системы с предельно возможным быстрым воздействием.

На операционном усилителе DA1 собран программатор тока пучка для заварки кратера. В исходном положении переключателя S1 на выходе DA1 устанавливается максимальное напряжение, которое определяется напряжением высокоточного стабилитрона VD2. При переключении S1 по команде «Заварка кратера» на вход усилителя через резистор R1 и реостат R2 подается отрицательное напряжение. Усилитель переходит в режим интегратора и напряжение на его выходе линейно падает до нуля. Поскольку выходное напряжение усилителя питает задающий потенциометр R3, то соответственно и напряжение задания тока пучка уменьшается до нуля. Время снижения напряжения задания тока пучка регулируется реостатом R2 и не зависит от задающего напряжения, определяемого потенциометром R3. Диапазон задания времени спада тока составляет от 0,5 до 5,0 с. На рис. 5 приведены осциллограммы задающего $U_{пр}$ напряжения, тока пучка и напряжения накала катода ЭЛП.

В исходном положении переключателя S1 «Стоп» на инвертирующий вход усилителя DA1 подано отрицательное напряжение. Выходное напряжение усилителя ограничивается диодом VD1 на приблизительно нулевом уровне. При пе-

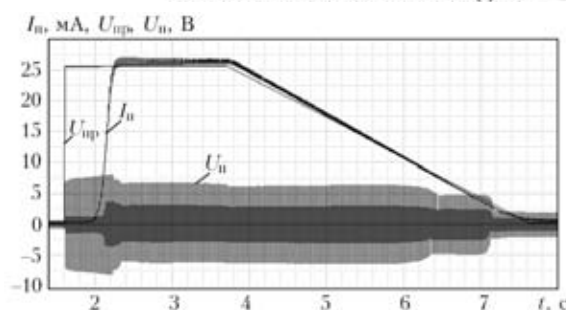


Рис. 5. Цикл работы блока управления током пучка

реключении S1 в положение «Пуск» на вход усилителя подается нуль, а на выходе благодаря небольшому внутреннему положительному смещению почти мгновенно устанавливается предельное отрицательное напряжение. С движка потенциометра R3 снимается задание тока пучка. Ток пучка I_n при максимальном напряжении накала катода U_n начинает нарастать с задержкой около 0,5 с, необходимой для нагрева катода до температуры начала эмиссии электронов. При желании это время можно существенно уменьшить, если в режиме «Стоп» установить начальный ток накала катода, при котором еще нет эмиссии электронов. Когда ток пучка достигнет заданного значения, напряжение накала снижается до необходимого уровня и регулятор работает в режиме стабилизации заданного значения тока. После переключения S1 в положение «Стоп» задающее напряжение $U_{пр}$ снижается по линейному закону и регулятор переходит в режим слежения, при котором ток пучка точно следует за задающим напряжением.

Выводы

1. Постоянная времени катода малоамперных ЭЛП составляет более 1 с.
2. Автоматическое регулирование тока пучка путем регулирования тока накала катода уменьшает время отработки изменения установки тока пучка на порядок.
3. Значение предельной частоты модуляции тока пучка путем регулирования тока накала катода составляет не более нескольких герц.
4. Данные, полученные для малоамперной ЭЛП, легко экстраполируются на пушки с большим током пучка, т. е. с более массивным, а следовательно, более инерционным катодом.

The system for automatic control of the beam current of directly heated electron beam welding guns is described. The data obtained for low-amperage guns can be extrapolated for guns with a high beam current.

Поступила в редакцию 27.02.2009



СТРУКТУРА И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА 20X5M2ФС, ЛЕГИРОВАННОГО СЕРОЙ И ФОСФОРОМ

И. А. РЯБЦЕВ, Я. П. ЧЕРНЯК, И. И. РЯБЦЕВ, кандидаты техн. наук,
В. А. ЖДАНОВ, И. Л. БОГАЙЧУК, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние легирования серой и фосфором на структуру и износостойкость наплавленного металла 20X5M2ФС. Установлено, что фосфор растворяется и упрочняет мартенситную составляющую структуры наплавленного металла, а сера образует с другими легирующими элементами сульфиды и оксисульфиды. Показано, что наиболее благоприятное сочетание износостойкости деталей пары трения обеспечивает наплавленный металл 20X5M2ФС, легированный 0,21 мас. % S и 0,56 мас. % P.

Ключевые слова: дуговая наплавка, среднелегированный наплавленный металл, микроструктура, фосфор и сера в стали, износостойкость, сульфиды, фосфиды

Фосфор и сера по отдельности могут с успехом использоваться в качестве легирующих элементов в наплавочных материалах различного назначения [1–5]. При этом фосфор положительно влияет на износостойкость наплавленного металла в результате упрочнения матрицы, а также образования включений фосфидов некоторых легирующих элементов [6]. В отличие от фосфора сера не растворяется в железе [7], а образует в наплавленном металле сульфиды и оксисульфиды, которые могут играть роль «твердой смазки» и препятствовать его изнашиванию за счет схватывания поверхностей трения [5].

Настоящая работа посвящена исследованию влияния совместного легирования серой и фосфором на структуру и износостойкость наплавленного металла 20X5M2ФС. Для экспериментов изготовлено восемь опытных порошковых проволок ПП-Нп-20X5M2ФС-оп диаметром 2 мм с различным содержанием серы и фосфора. На одинаковых режимах (ток 250...270 А; напряжение 24...26 В; скорость наплавки 28 м/ч) под флюсом АН-26П наплавляли образцы с целью определения химического состава и твердости наплавленного металла (табл. 1), а также его структуры (рис. 1) и износостойкости. При этом содержание серы и фосфора в наплавленном металле изменялось в пределах соответственно 0,02...1,40 и 0,06...0,97 мас. %.

Структура наплавленного металла 20X5M2ФС, не легированного серой и фосфором (образец № 1, табл. 1), состоит из мартенсита, остаточного аустенита и карбидов. Имеется также небольшая объемная доля неметаллических включений, идентифицированных как оксиды и сили-

каты (рис. 1, а). Микротвердость мартенсита $HV_{0,5}$ 3860...3620 МПа, остаточного аустенита $HV_{0,5}$ 2320...2460 МПа.

Возрастание массовой доли серы до 0,24 мас. % (образец № 2, табл. 1; рис. 1, б), а затем до 1,40 % (образец № 3, табл. 1; рис. 1, в) на структуру наплавленного металла практически не влияет, однако значительно увеличивает содержание в ней неметаллических включений за счет образования сульфидов и оксисульфидов.

Легирование наплавленного металла 20X5M2ФС фосфором (0,50 мас. %) в образце № 4 (табл. 1) приводит к возрастанию в структуре наплавленного металла остаточного аустенита (рис. 1, г). Микротвердость мартенсита увеличивается до $HV_{0,5}$ 4120...5490 МПа, по-видимому, за счет растворения в нем фосфора, в то время как микротвердость аустенита остается на том же уровне — $HV_{0,5}$ 2320...2570 МПа. Обнаружены неметаллические включения — оксиды и силикаты.

Таблица 1. Химический состав (мас. %) и твердость HRC наплавленного металла типа 20X5M2ФС, легированного серой и фосфором

№ образца	S	P	Остальные элементы	HRC
1	0,02	0,06	0,18...0,22 C 4,8...5,2 Cr 1,8...2,2 Mo 0,3...0,5 V	37...38
2	0,24	0,06		34...36
3	1,40	0,06		32...34
4	0,04	0,50		34...36
5	0,21	0,56		32...34
6	0,04	0,97		35...37
7	0,18	0,83		34...36
8	1,30	0,90		34...36

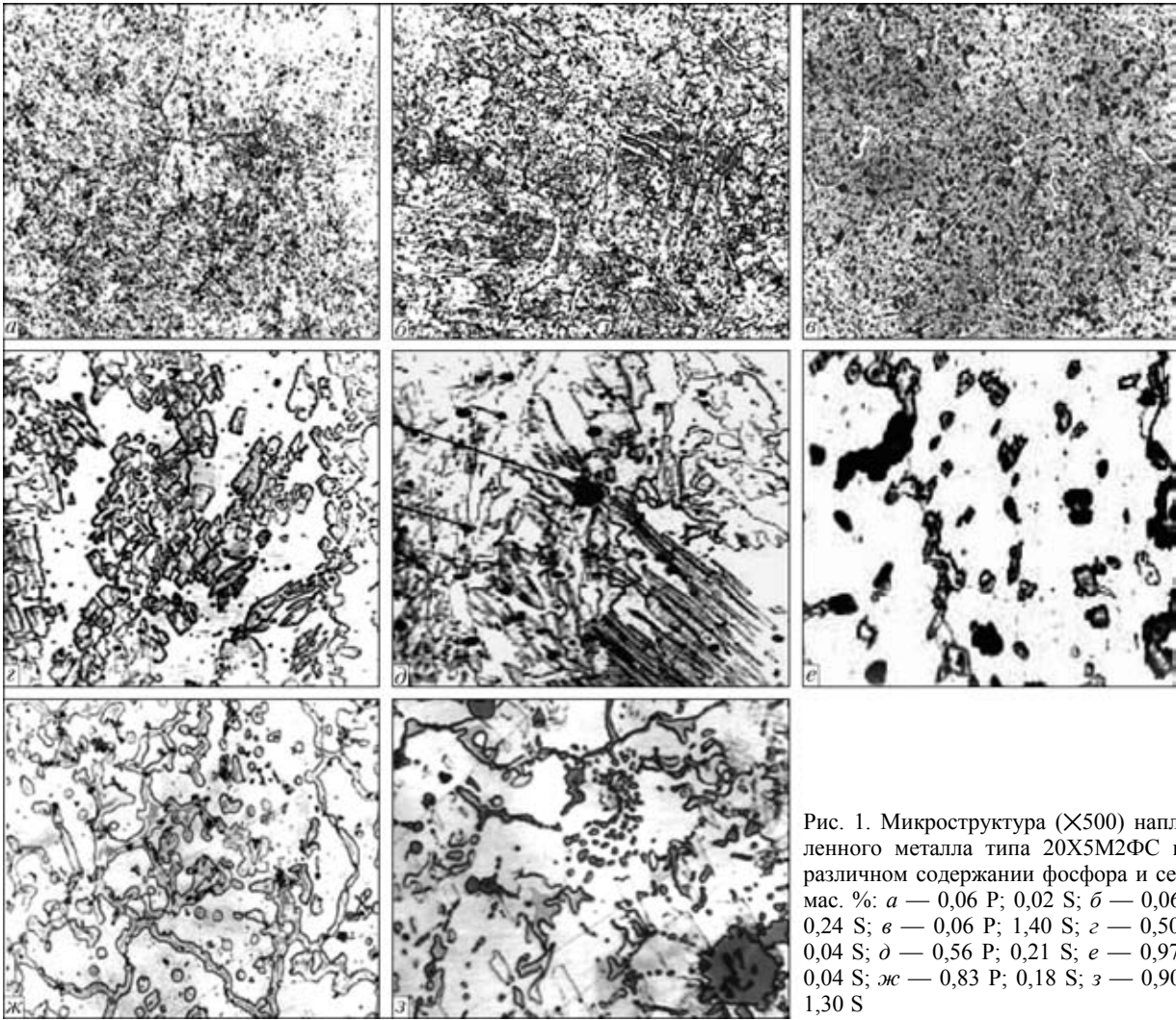


Рис. 1. Микроструктура ($\times 500$) наплавленного металла типа 20X5M2FC при различном содержании фосфора и серы, мас. %: а — 0,06 P; 0,02 S; б — 0,06 P; 0,24 S; в — 0,06 P; 1,40 S; г — 0,50 P; 0,04 S; д — 0,56 P; 0,21 S; е — 0,97 P; 0,04 S; ж — 0,83 P; 0,18 S; з — 0,90 P; 1,30 S

Введение в состав наплавленного металла 20X5M2FC 0,21 мас. % S (образец № 5, табл. 1) при содержании фосфора 0,56 мас. % приводит к увеличению объемной доли неметаллических включений, среди которых есть сульфиды и оксисульфиды. Основные структурные составляющие наплавленного металла — это мартенсит и остаточный аустенит (рис. 1, д), микротвердость которых остается на уровне микротвердости образца № 4.

В случае увеличения массовой доли фосфора до 0,97 % при стандартном содержании серы 0,04 мас. % (образец № 6, табл. 1) в структуре наплавленного металла появляется много светлых участков, свидетельствующих о худшей травимости (рис. 1, е) что, по-видимому, связано с увеличением коррозионной стойкости наплавленного металла при легировании его значительной массовой долей фосфора [8]. Микротвердость мартенсита составляет $HV 0,5 4730 \dots 5490$ МПа, а остаточного аустенита — $HV 0,5 2570 \dots 3050$ МПа.

При содержании фосфора 0,83 мас. % и серы 0,18 мас. % (образец № 7, табл. 1) наплавленный металл имеет ячеистую структуру (рис. 1, ж). Микротвердость мартенсита снижается до $HV 0,5$

3620...4120 МПа, а микротвердость остаточного аустенита остается на прежнем уровне $HV 0,5 2830 \dots 3060$ МПа. В структуре наплавленного металла присутствуют также сульфиды и оксисульфиды.

О повышении массовой доли серы до 1,30 % при практически неизменном содержании фосфора (образец № 8, табл. 1) в структуре наплавленного металла образуются крупные включения сульфидов и оксисульфидов (рис. 1, з).

Поскольку основное влияние на образование неметаллических включений оказывает сера, исследовали их распределение в наплавленном металле при различном содержании этого элемента. Проводили исследования нетравленных полированных шлифов на анализаторе «Omnimet» (увеличение 600) при просмотре 100 полей зрения (рис. 2, 3).

Как видно из рис. 3, с увеличением содержания серы резко возрастают количество и размер неметаллических включений. Так, при 0,02 мас. % S максимальный размер неметаллических включений составляет 2,0 мкм (рис. 3, б), при 0,24 мас. % S — 3,5 мкм (рис. 3, в), а при 1,40 мас. % S — 7,0 мкм (рис. 3, е). Общая объемная доля неметаллических

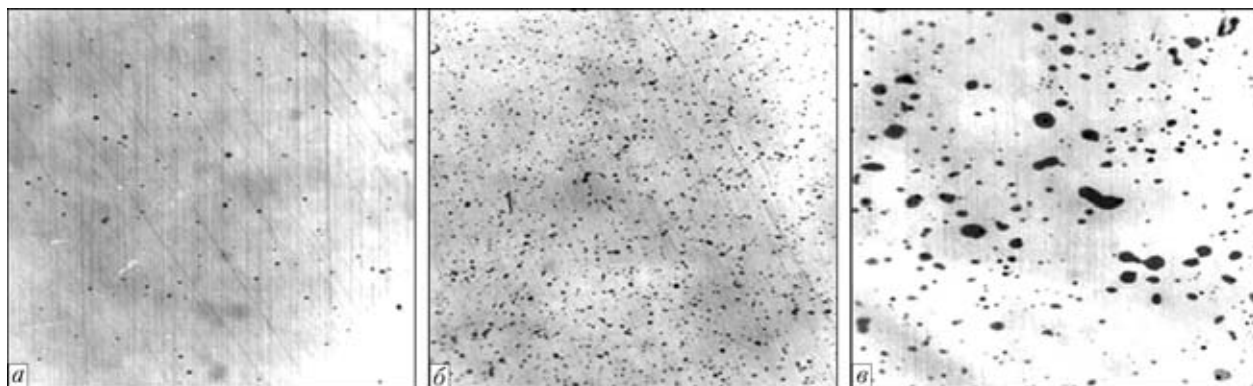


Рис. 2. Микроструктура (X600) наплавленного металла 20X5M2FC с содержанием серы 0,02 (а); 0,24 (б); 1,4 (в) мас. % (шлифы не травлены)

включений всех размеров увеличивается с 0,18 (0,02 мас. % S) до 4,01 % (1,40 мас. % S).

Микрорентгеноспектральный анализ наплавленного металла 20X5M2FC показал, что суль-

фиды имеют сложный состав — содержат повышенную массовую долю хрома, молибдена и марганца (табл. 2).

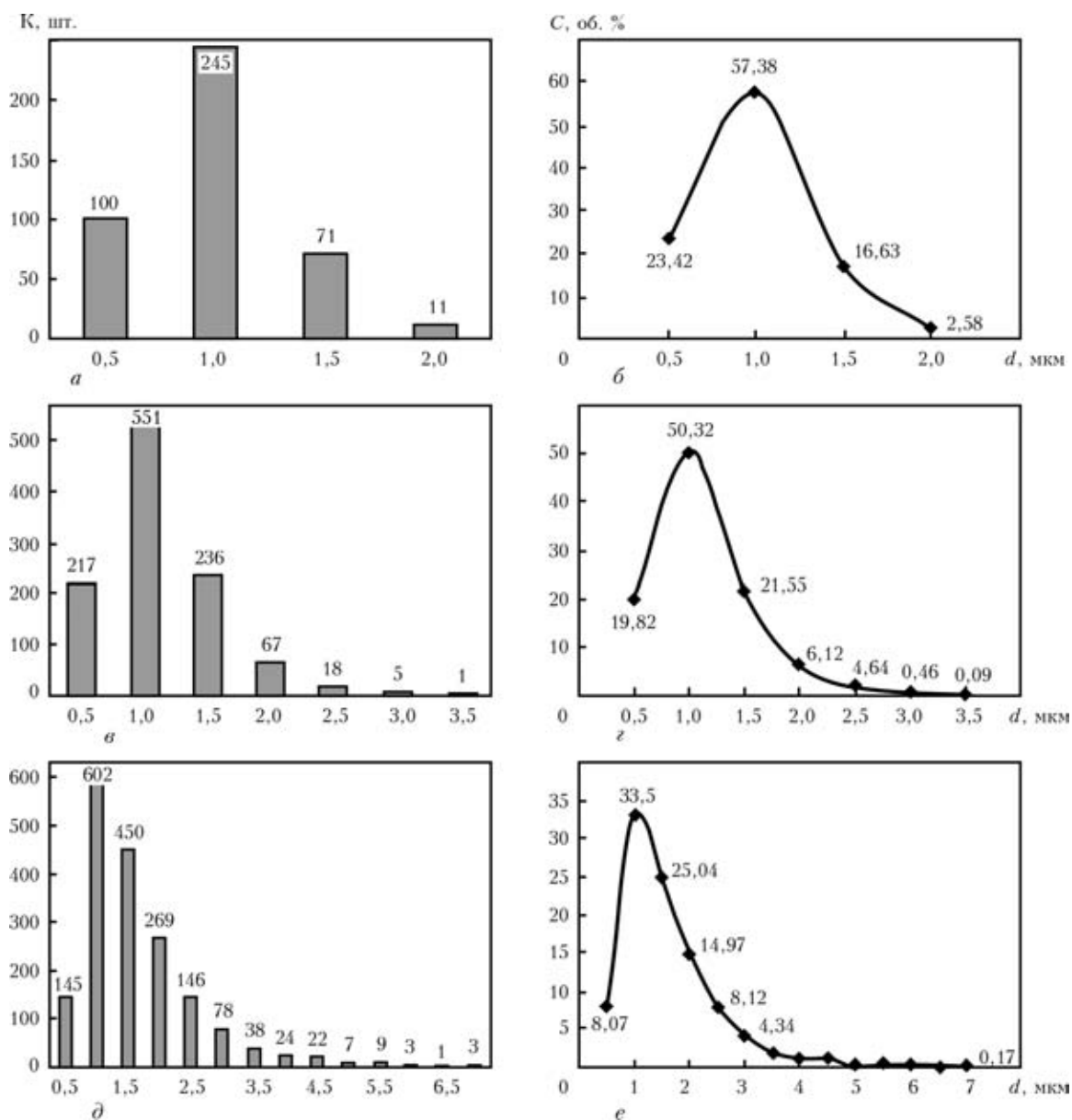


Рис. 3. Распределение по количеству К (а, в, д) и объемной доле С (б, г, е) неметаллических включений d в наплавленном металле 20X5M2FC при содержании серы 0,02 (а, б); 0,24 (в, г); 1,40 мас. % (д, е)



Таблица 2. Химический состав (мас. %) структурных составляющих наплавленного металла 20X5M2ФС (по результатам микрорентгеноспектрального анализа)

№ образца по табл. 1	Место анализа	Fe	Cr	Mo	V	Mn	Si	S
2	Матрица	89,09	6,38	3,98	0,44	0,04	0,87	—
	Сульфид	22,78	18,69	10,25	1,72	20,96	5,28	20,14
3	Матрица	91,07	6,72	2,01	0,45	0,20	0,68	0,08
	Сульфид	5,58	21,02	14,58	1,58	23,12	4,38	29,47
	» »	5,60	25,36	10,76	2,08	20,85	0,49	34,15

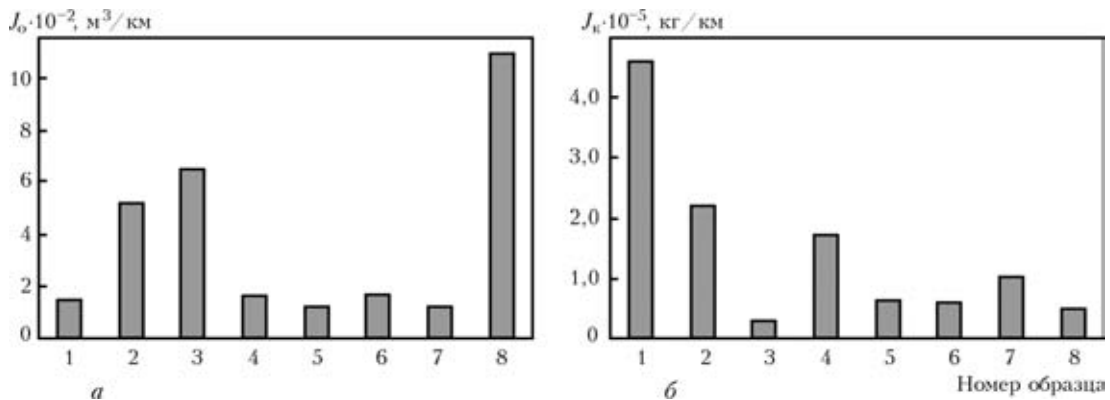


Рис. 4. Износостойкость образцов J_0 наплавленного металла 20X5M2ФС с различным содержанием серы, фосфора (а) и контртел J_k из стали 45, испытанных в паре с этими образцами, (б): 1–8 — номера образцов по табл. 1

Исследовали износостойкость образцов наплавленного металла 20X5M2ФС с различным содержанием серы и фосфора при сухом трении металла по металлу при комнатной температуре по схеме вал–плоскость (рис. 4). Образцы размером $3 \times 15 \times 25$ мм вырезали из наплавленного металла так, чтобы испытываемая плоскость попадала в верхние слои наплавленного металла. Вал-контртел диаметром 40 мм изготавливали из стали 45 и закаливали до твердости *HRC* 42. В процессе испытаний образец прижимался с определенным усилием к контртелу плоскостью, которая имела в плане размер 3×25 мм. В результате на испытываемой плоскости образуется лунка определенной глубины, а на контртеле — дорожка. Выбран следующий режим испытаний: скорость скольжения 1 м/с; нагрузка 30 Н; частота вращения контртела 30 об/мин. Этот режим обеспечивает стабилизацию триботехнических характеристик всех исследуемых образцов. Использование системы позиционирования позволяло повторять испытания каждого наплавленного образца не менее трех раз на новом участке поверхности трения образца и на новой дорожке трения контртела.

Как видно из приведенных данных, легирование только серой приводит к увеличению износа образцов наплавленного металла с одновременным резким уменьшением износа контртела (рис. 4, образцы № 1–3). Однако суммарный износ пары трения остается достаточно высоким. По-видимому, повышенный износ наплавленного

металла 20X5M2ФС, легированного серой, объясняется тем, что многочисленные сульфиды относительно крупных размеров в процессе изнашивания легко выкрашиваются из матрицы наплавленного металла. Эти сульфиды являются «твердой смазкой», а также препятствуют схватыванию поверхностей образца и контртела, в результате чего его износ уменьшается.

При легировании наплавленного металла фосфором (0,50 мас. %) (рис. 4, образец № 4) износ образца и контртела понижается. Наиболее благоприятное сочетание свойств имеет наплавленный металл 20X5M2ФС, легированный серой (0,21 мас. %) и фосфором (0,56 мас. %) (рис. 4, образец № 5). При таком содержании серы и фосфора износостойкость наплавленного металла на 10...15 % выше, чем наплавленного металла базового состава (рис. 4, а, образец № 1), одновременно существенно (в 8...10 раз) снижается износ контртела. Увеличение износостойкости наплавленного металла, по-видимому, объясняется тем, что фосфор упрочняет его матрицу. В то же время легирование наплавленного металла относительно небольшой массовой долей серы способствует образованию сульфидов, имеющих оптимальную форму, количество и размер. В результате проявления эффекта «твердой смазки» изнашивание контртела существенно снижается.

Таким образом, подтверждено, что сера в отличие от фосфора не растворяется в матрице наплавленного металла, а образует в ней сульфиды



и оксисульфиды, размеры и количество которых увеличиваются по мере роста содержания серы. Легирование наплавленного металла 20X5M2ФС 0,56 мас. % Р и 0,21 мас. % S обеспечивает высокую износостойкость наплавленного образца, в то время как относительно небольшое содержание серы способствует образованию сульфидов, оптимальных по форме, количеству и размерам. В результате проявления эффекта «твердой смазки» изнашивание контртела, контактирующего с наплавленным образцом, также существенно снижается.

1. Особенности плавления и кристаллизации наплавленного металла типа стали 20ХГС, легированного фосфором / Ю. М. Кусков, И. И. Рябцев, Л. К. Дорошенко, В. Г. Васильев // Автомат. сварка. — 2002. — № 8. — С. 24–27.
2. Рябцев И. И., Кусков Ю. М., Новикова Д. П. Влияние фосфора на трещиностойкость низкоуглеродистого наплавленного металла системы легирования Fe–Mn–Si–Cr // Там же. — 2006. — № 5. — С. 15–19.

The effect of alloying with sulphur and phosphorus on structure and wear resistance of deposited metal 20Kh5M2FS has been investigated. It has been proved that phosphorus dissolves to harden the martensitic component of structure of the deposited metal, whereas sulphur forms sulphides and oxy-sulphides with other alloying elements. It is shown that the most favourable combination of wear resistance of friction pair components is provided by deposited metal 20Kh5M2FS alloyed with 0.21 wt. % S and 0.56 wt. % P.

3. Рябцев И. И. Расчетно-экспериментальная оценка эффективности легирования фосфором высоколегированного наплавленного металла // Там же. — 2008. — № 5. — С. 18–22.
4. Осин В. В., Рябцев И. А. Влияние серы на свойства сплавов на основе железа и перспективы ее использования в наплавочных материалах // Там же. — 2004. — № 10. — С. 22–26.
5. Осин В. В., Рябцев И. А., Кондратьев И. А. Исследование влияния серы на свойства наплавленного металла Х5М3ФС // Там же. — 2006. — № 12. — С. 14–18.
6. Триботехнические характеристики наплавленного металла системы легирования Fe–Cr–Si–Mn–P / И. И. Рябцев, Ю. М. Кусков, В. Ф. Грабин и др. // Там же. — 2003. — № 6. — С. 20–24.
7. Лунев В. В., Аверин В. В. Сера и фосфор в стали. — М.: Металлургия, 1988. — 256 с.
8. Гуляев А. П., Цулкова В. М. Влияние фосфора на коррозионные свойства нержавеющей сталей // Коррозионностойкие металлические конструкционные материалы и их применение. — М.: Машиностроение, 1974. — С. 49–52.

Поступила в редакцию 25.02.2009

	<p>4-я международная специализированная выставка-конференция</p> <h2>Контроль и Диагностика</h2> <p>При поддержке: Комитета промышленной политики и развития предпринимательства Администрации Екатеринбурга Национального Агентства контроля и сварки Уральского государственного технического университета – УПИ Уральского института сварки</p>	
<p>Организатор:</p> <p>УРАЛЬСКИЕ ВЫСТАВКИ Выставочное Общество</p>	<p>1 – 3 декабря 2009 года, Екатеринбург</p>	<p>Место проведения:</p>  <p>ЦЕНТР МЕЖДУНАРОДНОЙ ТОРГОВЛИ ЕКАТЕРИНБУРГ</p>
<p>Основные направления выставки:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li style="width: 45%;">• Акустический контроль <li style="width: 45%;">• Радиационный контроль <li style="width: 45%;">• Акустико-эмиссионный контроль <li style="width: 45%;">• Электрический контроль <li style="width: 45%;">• Ультразвуковой контроль <li style="width: 45%;">• Тепловой контроль <li style="width: 45%;">• Вибрационный контроль <li style="width: 45%;">• Капиллярный контроль <li style="width: 45%;">• Вихретоковый контроль <li style="width: 45%;">• Магнитопорошковый контроль <li style="width: 45%;">• Оптический и визуальный контроль <li style="width: 45%;">• Электромагнитный контроль <p>Одновременно пройдет 9-я международная специализированная выставка-конференция «Сварка» Россия, 620027, Екатеринбург, ул. Свердлова, 11, а, оф. 507 тел./факс: +7(343) 355-51-95, 310-03-30 E-mail: kirillova@uv66.ru</p>		



ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ И ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ НАГРЕВЕ МНОГОСЛОЙНОЙ ФОЛЬГИ Al/Cu

А. И. УСТИНОВ, д-р физ.-мат. наук, **Я. И. МАТВИЕНКО**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
С. С. ПОЛИЩУК, канд. физ.-мат. наук, **А. Е. ШИШКИН**, инж.
(Ин-т металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины)

Сварка давлением через прослойку с многослойной структурой на основе интерметаллидообразующих элементов позволяет формировать в твердом состоянии неразъемные соединения трудносвариваемых материалов. На примере многослойной фольги Al/Cu оценена роль структуры прослоек в формировании неразъемных соединений. Показано, что в таких фольгах при непрерывном нагреве до 500 °С, кроме фазовых превращений, обусловленных реакционной диффузией компонент, в условиях постояннодействующих нагрузок наблюдается их пластическая деформация, интенсивность протекания которой зависит от температуры фольги.

Ключевые слова: диффузионная сварка давлением, электронно-лучевое осаждение, многослойная фольга, фазовое превращение, пластическая деформация

Применение многослойных фольг на основе интерметаллидообразующих элементов в качестве прослоек при диффузионной сварке давлением показало их высокую эффективность при формировании неразъемных соединений трудносвариваемых материалов [1–4]. При исследовании микроструктуры зоны сварного соединения установлено, что в процессе сварки между слоями прослоек происходит реакционная диффузия компонентов. Предполагается, что этот процесс способствует увеличению диффузионной подвижности атомов в областях материала, находящихся в непосредственном контакте с прослойкой, и обеспечивает «смягчение» условий, необходимых для формирования соединения.

Для достижения оптимальных параметров при формировании соединений с использованием многослойных фольг в качестве прослоек актуальным представляется установление процессов фазовых превращений в таких материалах в условиях, близких к реализуемым при диффузионной сварке.

Ранее последовательность фазовых превращений в многослойных фольгах исследовали посредством анализа микроструктуры и рентгеновской дифракционной картины до и после их нагрева с выдержкой при заданной температуре. Так, например, в случае многослойных фольг Al/Ni и Al/Ti определено, что процессы фазообразования в них характеризуются низкой энергией активации, их начальная стадия происходит уже при 250...350 °С [5, 6].

В то же время существуют системы, в которых температура начала твердофазных реакций бывает еще ниже. К ним относится система Al–Cu. В результате реакции между слоем меди и алюминия в данной системе наблюдали формирование интерметаллидов уже при температуре около 150 °С [7–9]. Таким образом, использование многослойных фольг Al/Cu в качестве прослойки при диффузионной сварке позволяет снизить температуру и время нагрева, необходимые для формирования неразъемного соединения, например, чистого алюминия, меди, а также их сплавов, по сравнению с процессом диффузионной сварки без применения прослоек [10], при сварке трением дополнительный отжиг исключается [11–13].

Учитывая также то, что фазовые превращения в многослойных фольгах в значительной мере определяются кинетическими факторами [5, 6], необходимым представляется исследование особенностей процессов фазообразования в многослойных фольгах непосредственно в процессе непрерывного нагрева, т. е. в условиях, близких к реализуемым в процессе диффузионной сварки.

Не менее важным фактором, который необходимо учитывать при выборе прослойки и режимов диффузионной сварки, является механическое поведение материала прослойки при нагреве в условиях постояннодействующих сжимающих усилий, которые прикладываются к свариваемым деталям. В связи с этим представляется необходимым изучение деформационного поведения многослойных фольг при их нагреве в условиях постояннодействующих напряжений.

В этой работе проводились исследования процессов фазообразования и деформационного по-

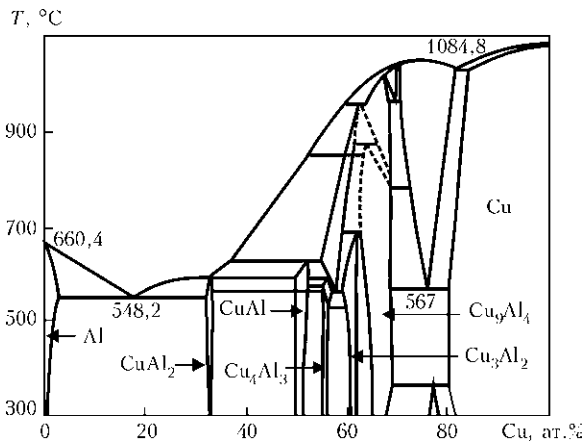


Рис. 1. Равновесная фазовая диаграмма Al-Cu [14]

ведения в условиях постояннодействующих напряжений при непрерывном нагреве многослойных фольг Al/Cu.

Исследовали структурные превращения в многослойных фольгах Al/Cu (84Al-16Cu) с периодом чередования слоев алюминия и меди 0,71 мкм. Согласно диаграмме состояния системы Al-Cu, 548,2 °C является минимальной температурой эвтектики (Al + CuAl₂) (рис. 1). Таким образом, состав многослойных фольг Al/Cu после осаждения соответствовал эвтектике с минимальной температурой плавления для данной системы.

Многослойные фольги Al/Cu с субмикронной толщиной слоев получены методом послойного электронно-лучевого осаждения компонентов на вращающуюся с постоянной скоростью подложку. С этой целью испарение с помощью электронных пушек осуществляли из двух источников алюминия и меди, разделенных непроницаемым экраном [15]. Выбор определенного соотношения между

интенсивностью паровых потоков алюминия и меди, а также скоростью вращения подложки позволяет расширить диапазон толщин (от 10 до 100 мкм) многослойных фольг Al/Cu с различной толщиной слоев меди и алюминия. Для получения отделяемых конденсатов на подложку предварительно осаждался слой соли NaCl, что позволяло впоследствии легко отделить фольгу от подложки. Давление в камере поддерживалось на уровне 5·10⁻³ Па. Интенсивность испарения обеспечивала скорость осаждения 50 нм/с. Температура подложки в процессе осаждения составляла около 120 °C.

Рентгенодифракционные структурные исследования фольги непосредственно после осаждения и непрерывного нагрева проводили в стандартной геометрии θ -2 θ на дифрактометре «ДРОН-4» в излучении Co K α . Микроструктура осажденных фольг

и их химический анализ исследовали методами сканирующей электронной микроскопии. Химический состав конденсатов контролировали с помощью сканирующего электронного микроскопа «CamScan-4», оснащенного энергодисперсионным спектрометром «Energy200». Для выявления структуры фольг использовали методы селективного химического травления.

Исследования фазовых превращений в многослойных фольгах Al/Cu проводили методом высокотемпературной in situ рентгеновской дифрактометрии в излучении кобальтового анода при температуре 20...520 °C и скорости нагрева около 20 °C/мин с использованием приставки УВД-2000 в вакууме при остаточном давлении около 1·10⁻² Па. Регистрацию дифрактограмм осуществляли с помощью изогнутого линейного позиционно-чувствительного детектора (ЛПЧД) проточного типа, работающего на газовой ксенон-метановой смеси (рис. 2). Апертура ЛПЧД обеспечивала одновременную регистрацию дифрагированного излучения в угловом диапазоне до 40°, радиус фокусировки камеры детектора составлял 200 мм, угловая разрешающая способность — 0,03°. Для определения координаты зарегистрированного кванта в ЛПЧД была использована временная схема декодирования позиционной информации, учитывающая разницу во времени движения заряда вдоль линии задержки от места сбора до сопротивления нагрузки линии.

Информация о координате регистрации и интенсивности дифрагированного излучения передавалась через многоканальный анализатор на вход компьютера, где она фиксировались одновременно с данными о температуре образца, поступающими на вход компьютера через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) непосредственно с термодпары. Непрерывный нагрев образца обеспечивался с помощью высокоточного регулятора температуры, который изменяет мощность

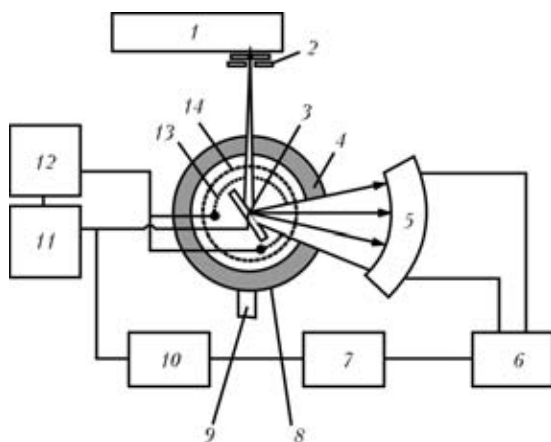


Рис. 2. Принципиальная схема высокотемпературного дифрактометра УРВТ с использованием для регистрации дифрагированного излучения: 1 — рентгеновская трубка; 2 — вертикальная и горизонтальная щели; 3 — термодпара; 4 — камера; 5 — ЛПЧД; 6 — преобразователь сигналов; 7 — многоканальный анализатор; 8 — образец; 9 — выход на диффузионный насос; 10 — компьютер; 11 — высокоточный регулятор температуры; 12 — блок питания нагревателя; 13 — нагреватель; 14 — радиатор для обеспечения равномерности нагрева образца



нагревателя в зависимости от сигнала, снимаемого с термопары.

Для исследования деформационного поведения фольг образец микрослойной фольги Al/Cu длиной 20, шириной 8 мм помещали в измерительный блок, схема которого представлена на рис. 3. Для определения уровня деформации образца один конец прикрепляли к площадке, которую через растянутую стальную пружину присоединяли к неподвижному основанию блока, а другой — к подвижному кварцевому стержню, соединенному с неподвижным датчиком линейных перемещений. В качестве последнего использовали индуктивный датчик. Часть измерительного блока, в котором находился образец, размещали между нагревателями. Для контроля температуры к фольге присоединяли тонкую термопару. Управление нагревом осуществляли посредством программного обеспечения, регулирующего мощность нагревателя в зависимости от сигнала, который снимается с термопары, закрепленной на образце.

Суть метода заключалась в измерении изменения длины фольги при нагреве или охлаждении в условиях постояннодействующей растягивающей нагрузки (для этой цели использовали пружины, обеспечивающие растягивающую нагрузку около 10 Н). Измерения длины образца ΔL при постоянной нагрузке в зависимости от температуры проводили с помощью датчиков линейного перемещения, которые через АЦП подсоединены к компьютеру. Это позволяло фиксировать данные об изменении длины образца ΔL и его температуры в процессе нагрева или охлаждения. На основании полученных данных об изменении длины образца и исходных значений L_0 рассчитаны температурные зависимости деформации образца $\epsilon = \Delta L/L_0$ и ее изменение (скорость) при нагреве или охлаждении $d\epsilon/dT = (1/L_0)dL/dT$ во всем интервале температур. Конструкция установки и чувствительность датчика линейных перемещений обеспечивают выполнение

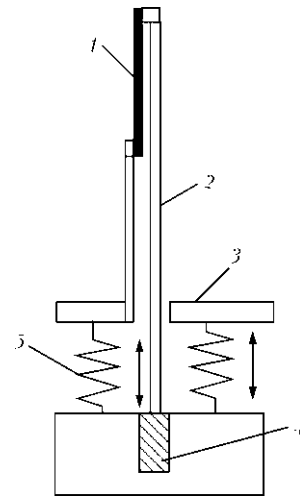


Рис. 3. Схема блока измерения деформации фольги под действием одноосной нагрузки в условиях непрерывного нагрева: 1 — образец фольги; 2, 3 — соответственно подвижные и неподвижные части блока; 4 — индуктивный датчик, помещенный на подвижную платформу; 5 — пружина

измерений деформации материалов с относительной погрешностью не более 10 %.

Из рис. 4, а видно, что фольга состоит из непрерывных слоев, отличающихся по контрасту: светлые слои соответствуют меди, темные — алюминию. На рис. 4, б представлена рентгеновская дифракционная картина осажденной многослойной фольги Al/Cu. Поскольку на рентгеновской дифракционной картине присутствуют только пики, соответствующие меди и алюминию, то можно сделать вывод, что после осаждения многослойная фольга Al/Cu состояла только из слоев меди и алюминия.

На рис. 5 представлены характерные рентгеновские дифракционные картины для некоторых температур в интервале значений углов $2\theta = 42...54^\circ$, полученные при непрерывном нагреве многослойной фольги Al/Cu до 520°C . Такой интервал углов выбран как самый репрезентативный с наиболее интенсивными пиками от алюминия,

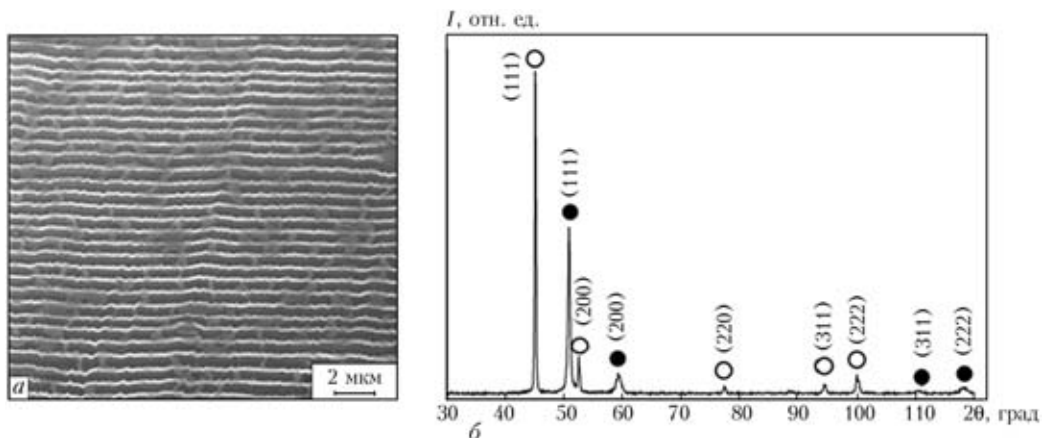


Рис. 4. Микроструктура поперечного сечения образца многослойных фольг Al/Cu в исходном состоянии (а) и дифрактограмма, полученная после осаждения фольги (б): ● — фаза меди; ○ — алюминия; I — интенсивность излучения

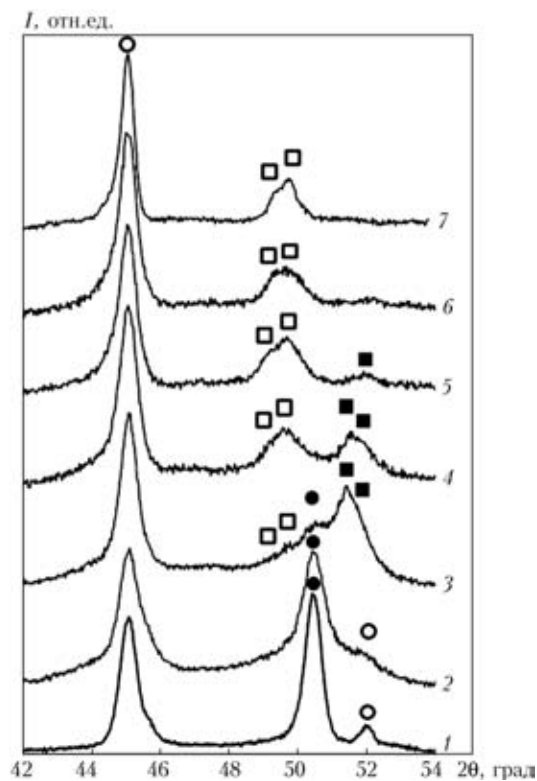


Рис. 5. Характерные фрагменты дифрактограмм образцов многослойных фольг Cu/Al, нагретых до 40 (1), 80 (2), 130 (3), 180 (4), 260 (5), 360 (6) и 520 °C (7), полученные в процессе непрерывного нагрева со скоростью 20 °C/мин (идентифицированные в образцах фазы указаны на рисунке символами: ● — Cu; ○ — Al; □ — CuAl₂; ■ — CuAl)

меди и от тех фаз, которые могут образоваться в результате реакции.

Из рис. 5 (кривая 2) видно, что нагрев до температуры 80 °C образца многослойных фольг Al/Cu приводит к изменению дифракционной картины вблизи пика (111)_{Cu} по сравнению с дифракционной картиной при более низкой температуре нагрева (рис. 5, кривая 1), идентичной полученной для фольг в исходном состоянии. Очевидно, это связано с тем, что уже при этой температуре происходит твердофазная реакция между медью и алюминием. Последующее повышение температуры нагрева до 130...180 °C (рис. 5, кривые 3, 4) приводит к росту интенсивности пиков от образовавшихся фаз вблизи (111)_{Cu} и дает возможность их идентифицировать как фазы CuAl₂ и CuAl. Так, исходя из изменения относительной интенсивности пиков, можно проследить, что при температуре 130 °C объемная доля фаз CuAl и CuAl₂ больше объемной доли меди, а при 180 °C пики меди полностью исчезают. При повышении температуры до 260 °C и выше (рис. 5, кривая 5) имеет место рост объемной доли фазы CuAl₂ и уменьшение объемной доли фазы CuAl. Поскольку на дифрактограммах присутствуют только пики от чистого алюминия и фазы CuAl₂ (рис. 5, кривые 6, 7), а образование новых фаз при температуре 360 °C и выше не наблю-

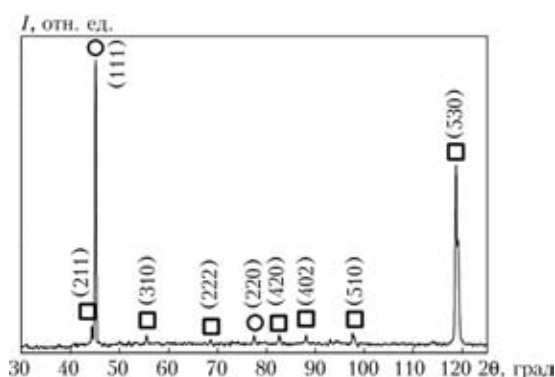
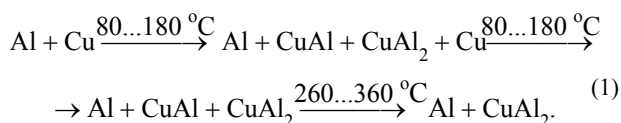


Рис. 6. Характерные фрагменты дифрактограмм образцов многослойных фольг Al/Cu после непрерывного нагрева до 520 °C со скоростью 20 °C/мин: ○ — алюминий; □ — CuAl₂

дается, можно предположить, что в результате формируется двухфазное состояние фольги (Al + CuAl₂).

Рентгеновская дифракционная картина образца многослойных фольг Al/Cu после непрерывного нагрева до 520 °C представлена на рис. 6. Видно, что, действительно, в результате нагрева материал имеет гетерофазную структуру, включающую чистый алюминий и фазу CuAl₂. Такое структурное состояние фольг для заданного при осаждении соотношения компонент соответствует эвтектике (Al + CuAl₂) с минимальной температурой плавления 548,2 °C (см. рис. 1).

Таким образом, при непрерывном нагреве до 520 °C многослойных фольг Al/Cu с составом, близким к эвтектическому, последовательность фазовых превращений можно представить в виде цепочки



Следует отметить, что зафиксированная в данной работе температура начала твердофазных реакций (около 80 °C) ниже температуры превращений, наблюдавшихся для системы Al–Cu, полученной осаждением слоя меди и алюминия [7–9, 16] или прокаткой [17, 18]. Последовательное образование фаз (первой фазы CuAl₂, а при дальнейшем повышении температуры или времени нагрева фаз AlCu и Al₉Cu₄) имело место только при нагреве от 150 до 500 °C в образцах фольг Al/Cu [7–9]. В системе Al–Cu, полученной прокаткой после длительных отжигов при 250 °C после осаждения [16] и при 450 °C [18], происходило одновременное формирование интерметаллидов CuAl₂, AlCu и Al₉Cu₄ на границе слоев. Отличие температуры начала реакций и фазовых превращений от известных из литературы данных может быть связано с особенностями структуры (размер зерен равный толщине слоя, высокая концентрация дефектов в объеме и на границах слоев) мно-



гослойных фольг Al/Cu, полученных способом электронно-лучевого осаждения, которая существенно влияет на кинетические факторы.

Результаты исследования деформационного поведения фольг при нагреве в условиях постоянно действующего одноосного растяжения представлены на рис. 7. Из анализа этих кривых видно, что температурную зависимость деформации фольги условно можно разделить на три участка: первый (от 80 до 250...260 °С) — происходит монотонное увеличение деформации; второй (от 250...260 до 350...370 °С) — длина образца вначале несколько уменьшается, а затем почти не изменяется; третий (свыше 350...370 °С) — имеет место интенсивная пластическая деформация с нарастающей скоростью.

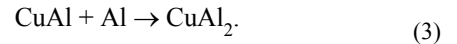
Сопоставив полученные данные и результаты рентгенографических исследований фазовых превращений в фольгах при их нагреве, можно сделать вывод, что интенсивная пластическая деформация фольги на первом температурном участке главным образом обусловлена превращениями



При нагреве фольги до 250...260 °С эти реакции завершаются, что обусловлено исчерпанием меди, вследствие чего пластическая деформа-

ция фольги практически не происходит. Более того, при дальнейшем повышении температуры фольга даже незначительно сокращается (при этом скорость деформации становится отрицательной).

Как следует из данных рентгеноструктурного анализа, дальнейшее повышение температуры сопровождается фазовым превращением метастабильной (при данном соотношении компонент в фольге) фазы CuAl в стабильную CuAl₂ путем взаимодействия интерметаллида CuAl с имеющимся в избытке алюминием:



Незначительная деформация образца в данном температурном интервале происходит главным образом за счет удлинения фольги. Об этом можно судить, сравнив наклоны температурных кривых деформации образца на этом участке при нагреве и охлаждении. На рис. 7 можно видеть, что зависимость деформации образца от температуры при охлаждении несколько больше, чем при нагреве. На этом основании можно предположить, что реакция (3) протекает с отрицательным объемным эффектом.

При температуре выше 350...370 °С (третий участок на кривой деформации) наблюдается увеличение скорости пластического течения образца. Скорость деформации при этом нарастает и при температуре выше 450 °С напоминает экспоненциальную зависимость. Принимая во внимание, что при достижении этой температуры фазовые превращения в фольге завершились и сформировалось двухфазное состояние из чистого алюминия и фазы CuAl₂, такое деформационное поведение фольги может быть связано только с механическими свойствами этой гетерофазной системы. Известно, что в подобных системах при повышенной температуре пластическая деформация главным образом определяется процессами зернограничного проскальзывания [19, 20]. Этому способствует гетерофазное состояние фольги, затрудняющее протекание рекристаллизационных процессов.

Известно, что сдавливающие усилия, которые накладываются на зону соединения, должны обеспечивать увеличение площади контакта соединяемых поверхностей, способствовать разрушению оксидных пленок в них и активировать диффузионную подвижность атомов благодаря пластической деформации их поверхностных слоев [19]. Это позволяет установить физический контакт между соединяемыми поверхностями, т. е. устраняет барьеры для диффузионных потоков атомов между соединяемыми поверхностями. Решение поставленной задачи значительно облегчается, если прослойка испытывает пластическое течение при напряжениях, которые развиваются в

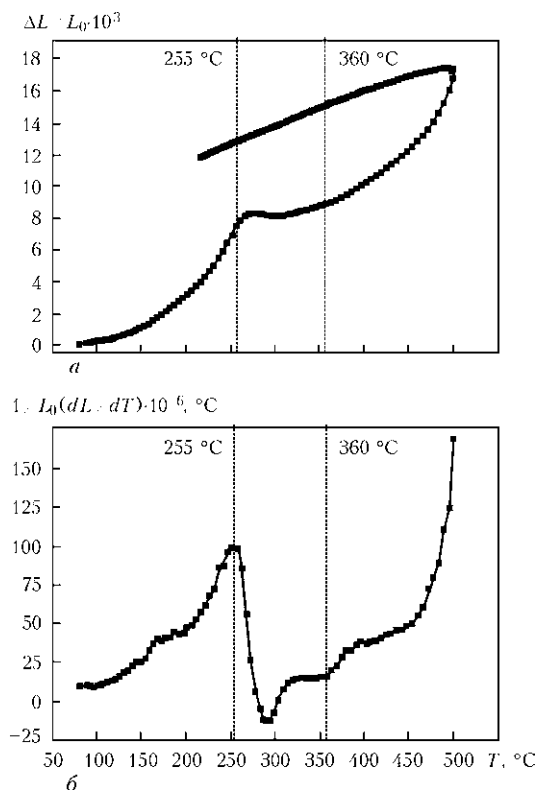


Рис. 7. Зависимость деформации $\Delta L/L_0$ (а) и ее скорости $1/L_0(dL/dT)$ (б) от температуры нагрева со скоростью 50 °С/мин образца многослойных фольг Al/Cu (84Al-16Cu) в условиях постояннодействующего растягивающего напряжения



зоне соединения при наложении внешних сдвигающих усилий.

Полученные данные о механическом поведении слоистого материала при непрерывном нагреве в условиях постояннодействующих нагрузок показали, что существует два температурных интервала ее интенсивной пластической деформации. Первый может быть связан с сверхпластичностью слоистой фольги, обусловленной протеканием твердофазных реакций между ее компонентами при нагреве, второй — со структурной сверхпластичностью, обусловленной деформационным поведением гетерофазной структуры, сформированной в процессе протекания твердофазной реакции. Можно предположить, что сверхпластичность многослойной фольги будет способствовать снижению не только температуры разогрева зоны соединения, но и необходимых для этого сдвигающих усилий. В совокупности процессы как реакционной диффузии, так и повышенной пластичности слоистых материалов при нагреве способствуют «смягчению» условий получения сварных соединений с помощью таких прослоек.

Выводы

1. На примере многослойных фольг Al/Cu показано, что при их непрерывном нагреве в условиях постояннодействующих напряжений они испытывают наряду с фазовыми превращениями пластическую деформацию.

2. Установлено, что наиболее интенсивно пластическое течение многослойных фольг Al/Cu (прослоек) происходит в двух температурных интервалах. Первый совпадает с температурным интервалом твердофазных реакций синтеза интерметаллидных соединений (80...240 °C), второй — соответствует пластическому течению гетерофазной структуры с дисперсными компонентами, сформированной в результате твердофазных реакций при температуре около 450 °C, т. е. на 100 °C ниже температуры плавления эвтектики Al + CuAl₂.

1. Cao J., Feng J. C., Li Z. R. Microstructure and fracture properties of reaction-assisted diffusion bonding of TiAl intermetallic with Al/Ni multilayer foils // *J. Alloys and Compounds*. — 2008. — **466**. — P. 363–367.
2. Diffusion welding of γ -TiAl based alloys through nano-layered foil of Ti/Al system / A. I. Ustinov, Yu. V. Falchenko, A. Ya. Ishchenko et al. // *Intermetallics*. — 2008. — № 16. — P. 1043–1045.
3. Nanometric multilayers: A new approach for joining TiAl / A. S. Ramos, M. T. Vieira, L. I. Duarte et al. // *Ibid.* — 2006. — № 14. — P. 1157–1162.

Pressure welding through the interlayer with a multilayer structure, based on intermetallic-forming elements, allows solid-state formation of permanent joints in hard-to-weld materials. The role of structure of the interlayers in formation of permanent joints has been evaluated by an example of multilayer foil Al/Cu. It is shown that such foils subjected to continuous heating to 500 °C under conditions of permanent loads are characterised, in addition to phase transformations caused by reaction diffusion of components, also by plastic deformation, the intensity of which depends upon the foil temperature.

4. Pascal C., Marin-Ayral R. M., Te'denac J. C. Joining of nickel monoaluminide to a superalloy substrate by high pressure self-propagating high-temperature synthesis // *J. Alloys and Compounds*. — 2002. — **337**. — P. 221–225.
5. Effect of overall composition on thermally induced solid-state transformations in thick EB PVD Al/Ni multilayers / A. Ustinov, L. Olikhovska, T. Melnichenko, A. Shyshkin // *Surf. Coat. Techn.* — 2008. — **202**. — P. 3832–3838.
6. Solid-phase reactions at heating of multi-layered Al/Ti foils produced by the method of electron beam deposition / A. Ustinov, L. Olikhovskaya, T. Melnichenko et al. // *Advances in Electrometallurgy*. — 2008. — № 2. — P. 19–26.
7. Investigation of diffusion in the Cu–Al thin film system / A. E. Gershinski, B. I. Fomin, E. I. Cherepov, F. L. Edelman // *Thin Solid Films*. — 1977. — № 42. — P. 269–275.
8. Hentzell H. T. G., Thomson R. D., Tu K. N. Interdiffusion in copper-aluminium film bilayers. Pt. I: Structure and kinetics of sequential compound formation // *J. Appl. Phys.* — 1983. — № 54. — P. 6923–6928.
9. Hentzell H. T. G., Thomson R. D., Tu K. N. Interdiffusion in copper-aluminium film bilayers. Pt. II: Analysis of marker motion during sequential compound formation // *Ibid.* — P. 6923–6928.
10. Ay I., Celik S., Celik I. Comparison of properties of friction and diffusion welded joints made between the pure aluminium and copper bars // *BAU fen Bilimleri Enstitusu Dergisi*. — 1999. — № 1. — P. 88–102.
11. Lee W.-B., Bang K.-S., Jung S.-B. Effects of intermetallic compound on the electrical and mechanical properties of friction welded Cu/Al bimetallic joints during annealing // *J. Alloys and Compounds*. — 2005. — **390**. — P. 212–219.
12. Ouyang J., Yarrapareddy E., Kovacevic R. Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper // *J. Materials Proc. Techn.* — 2006. — **172**. — P. 110–122.
13. Abdollah-Zadeh A., Saeid T., Sazgari B. Microstructural and mechanical properties of friction stir welded aluminum/copper lap joints // *J. Alloys and Compounds*. — 2008. — **460**. — P. 535–538.
14. Binary alloy phase diagrams / T. B. Massalski, H. Okamoto, P. R. Subramanian, L. Kacprzak. — Ohio: ASM International, Materials Park, 1986. — 526 c.
15. Диффузионная сварка микродисперсного композита AMg5 + 27 % Al₂O₃ с применением многослойной фольги Ni/Al / А. Я. Ищенко, Ю. В. Фальченко, А. И. Устинов и др. // *Автомат. сварка*. — 2007. — № 7. — P. 5–9.
16. Rajan K., Wallach E. R. A transmission electron microscopy study of intermetallic formation in aluminium-copper thin film couples // *J. Cryst. Growth*. — 1980. — № 49. — P. 297–302.
17. Abbasi M., Karimi Taherib A., Salehia M. T. Growth rate of intermetallic compounds in Al/Cu bimetal produced by cold roll welding process // *J. Alloys and Compounds*. — 2001. — **319**. — P. 233–241.
18. Heness G., Wuhler R., Yeung W. Y. Interfacial strength development of roll-bonded aluminium/copper metal laminates // *Mater. Sci. and Eng. A*. — 2007. — 483/484. — P. 740–743.
19. Тихонов А. С. Эффект сверхпластичности металлических материалов и сплавов. — М.: Наука, 1978. — 140 с.
20. Пшеничнюк А. И., Кайбышев О. А., Астанин В. В. Модель сверхпластичности, основанная на представлениях о кооперативном зернограничном проскальзывании // *Мат. моделирование систем и процессов*. — 1998. — № 6. — С. 99–109.

Поступила в редакцию 06.04.2009

ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Академик **Б. Е. ПАТОН**, **В. Д. ШЕЛЯГИН**, канд. техн. наук, **С. В. АХОНИН**, д-р техн. наук,
В. Ф. ТОПОЛЬСКИЙ, **В. Ю. ХАСКИН**, кандидаты техн. наук, **И. К. ПЕТРИЧЕНКО**, **А. В. БЕРНАЦКИЙ**,
Р. Н. МИЩЕНКО, **А. В. СИОРА**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Выбрана оптимальная схема газовой защиты при лазерной сварке, с использованием которой получены соединения ВТ1-0, ВТ6, СП15, ВТ22, ВТ23 и Т110. Установлена возможность лазерной сварки низко- и среднелегированных сплавов. Показано, что для высоколегированных титановых сплавов необходимо провести дальнейшее усовершенствование технологии лазерной сварки.

Ключевые слова: лазерная сварка, титановые сплавы, газовая защита, параметры режима, стыковые соединения, механические свойства, коррозионная стойкость под напряжением

Титановые сплавы широко применяются в авиационной и космической технике, судостроении, химическом машиностроении, энергетике и многих других областях современной промышленности [1]. Так, в самолетостроении используют стрингерные панели, которые получают путем приваривания прорезными швами ребер жесткости к цельному полотнищу. Для ответственных длинномерных конструкций морских судов применяют сварные тавровые балки из титанового сплава. Решение указанных задач усложняется большими размерами и малой толщиной стенок свариваемых деталей. В связи с этим для изготовления тонколистовых конструкций из титановых сплавов обычно применяют электронно-лучевую сварку (ЭЛС) [2]. Однако такой способ сварки не всегда приемлем для крупногабаритных конструкций в связи с необходимостью применения вакуумных камер. Традиционные дуговые способы сварки зачастую имеют невысокую производительность и могут приводить к образованию значительных поводов и короблению сварных конструкций [3]. Лазерная сварка позволяет получать узкие швы с малой зоной термического влияния (ЗТВ) без использования сложных вакуумных камер со скоростью, в 2...3 раза (и более) превышающую скорость дуговой сварки [4].

Первые попытки применения лазерного излучения для сварки титановых сплавов предпринимались еще в начале 1970-х годов, в частности, в ИЭС им. Е. О. Патона [5]. Было определено, что в связи с активным химическим взаимодействием жидкого металла сварочной ванны с окружающей средой необходима надежная защита инертным газом. Из работы [5] следует, что для защиты металла ванны применение гелия вместо

аргона позволяет повысить глубину проплавления металла более чем на 50 %.

В начале 1980-х годов уже были предприняты первые попытки внедрения в промышленность технологии лазерной сварки для изготовления титановых изделий. В этом плане следует отметить работы ФИАЭ им. И. В. Курчатова. В 1983 г. на ВО «Балтийский завод» была внедрена промышленная технология лазерной сварки специального теплообменного модуля из титанового сплава. С помощью лазера выполняли вваривание трубок с толщиной стенки до 2,5 мм в трубную доску [6]. В работе [7] также отмечена возможность применения лазерного излучения для сварки титановых изделий.

Цель настоящей работы заключалась в оптимизации технологического процесса лазерной сварки по критериям механических характеристик сварных соединений титановых сплавов путем подбора скорости процесса сварки при фиксированной мощности лазерного излучения. Для достижения этой цели создана система газовой защиты сварочной ванны и той ее хвостовой части, в которой металл имел температуру свыше 200 °С, поскольку именно при такой температуре возможно насыщение верхнего слоя металла шва и основного металла азотом воздуха [1]. В качестве материала образцов выбраны технический титан ВТ1-0, среднелегированный β -стабилизаторами сплав ВТ6, и высоколегированные сплавы СП15, ВТ22, ВТ23, Т110 толщиной $b = 5,0...7,5$ мм. Химический состав этих сплавов приведен в табл. 1.

В ходе экспериментов сваривали стыковые соединения пластин размером $300 \times 50 \times b$ мм с применением Nd:YAG-лазера модели DY 044 (фирмы «Rofin Sinar», Германия) мощностью до 4,4 кВт и входящий в состав сварочной головки объектив с фокусным расстоянием $F = 300$ мм. Излучение от лазера к объективу передавалось по оптическому волокну диаметром 600 мкм. В процессе



Таблица 1. Химический состав (мас. %) основного металла свариваемых образцов

Материал	Al	Mo	V	Fe	Cr	Nb	Zr	O ₂	N ₂	H ₂
BT1-0	0,40	—	—	0,15	—	—	—	0,10	0,035	0,008
BT6	6,35	—	4,20	—	—	—	—	0,15	0,050	0,012
СП15	4,50	3,18	3,30	—	—	4,22	1,9	0,16	0,028	0,002
BT22	6,00	4,80	5,10	1,00	1,0	—	—	0,18	0,050	0,015
BT23	4,50	2,00	4,50	0,60	1,0	—	—	0,17	0,004	0,018
T110	4,90	0,90	1,25	1,61	—	4,74	0,5	0,13	0,040	0,002

сварки перемещалась сварочная головка с системой защиты. Во всех случаях нижняя (корневая) часть сварного шва была защищена аргоном, расход которого составлял 7 л/мин. Он подавался по трубке, расположенной в прижимном приспособлении. Верхняя часть шва (ванна расплава и ее хвостовая часть) была защищена с помощью сопла сварочной головки.

С целью оптимизации конструкции защитного сопла и выбора вида защитного газа проведена серия предварительных экспериментов. Вначале испытаний использовали схему лазерной сварки, представленную на рис. 1. Установлено, что подача защитного газа (аргона или гелия) перед ходом сварочной головки приводит к подосу воздуха в зону сварки, что является недопустимым. Затем опробована схема, показанная на рис. 2. Коаксиальная подача газа (аргона или гелия) позволила достаточно надежно защитить зону сварки, но при этом значительно (до 50 %) снизилась глубина проплавления металла по сравнению с проплавлениями, полученными при сварке по схеме, представленной на рис. 1. Кроме того, выясни-

лось, что схема сварки, представленная на рис. 2, не обеспечивает защиту остывающего металла от окружающего воздуха. В результате происходило насыщение тонкого (около 0,1...0,3 мм) поверхностного слоя металла шва азотом с образованием нитрида титана, имеющего золотистый цвет.

Для устранения недостатков газовой защиты обеих схем разработана система дифференциальной подачи ламинарных газовых потоков, защищающих сварочную ванну и остывающий металл хвостовой зоны от воздействия воздуха (рис. 3). Такая схема сварки позволяет устранять указанные выше недостатки двух предыдущих схем. В ходе исследования ее технологических возможностей установлено, что подача аргона для защиты сварочной ванны приводит к частичному экранированию лазерного излучения образующимся над ванной плазменным факелом, что значительно снижает глубину проплавления. Использование гелия позволяет устранить данный эффект. В связи с этим для дальнейшего проведения экспериментов использована схема сварки, показанная на рис. 3, в которой в качестве защитного газа для сварочной ванны использовали гелий (расход $Q_1 = 7$ л/мин), а для защиты остывающего

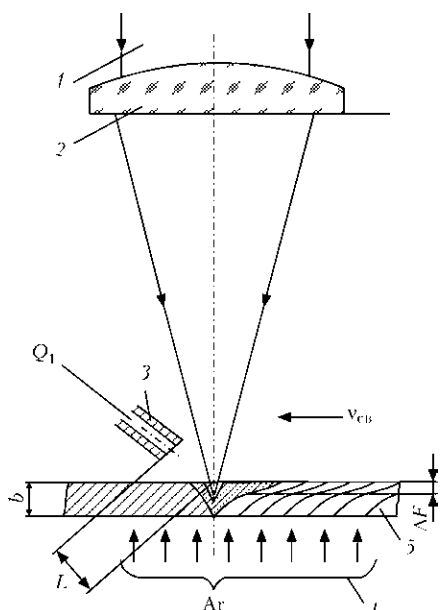


Рис. 1. Схема лазерной сварки с подачей газа спереди хода сварочной головки: 1 — лазерное излучение; 2 — фокусирующий объектив; 3 — сопло для подачи защитного газа; 4 — защита корня шва; 5 — образец; Q_1 — расход защитного газа; $v_{св}$ — скорость сварки; ΔF — заглупление фокуса

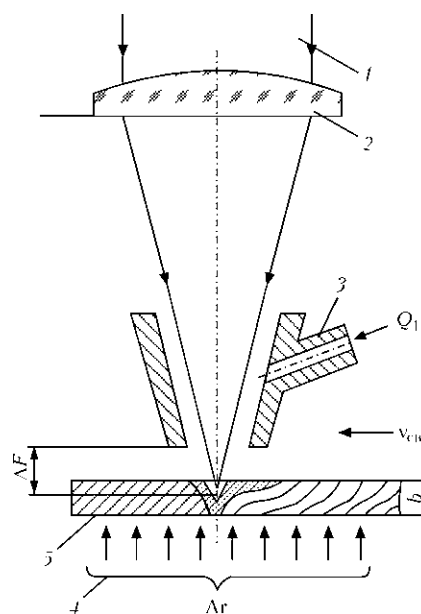


Рис. 2. Схема лазерной сварки с коаксиальной подачей защитного газа (здесь и на рис. 3 1–5 обозначения — см. рис. 1)

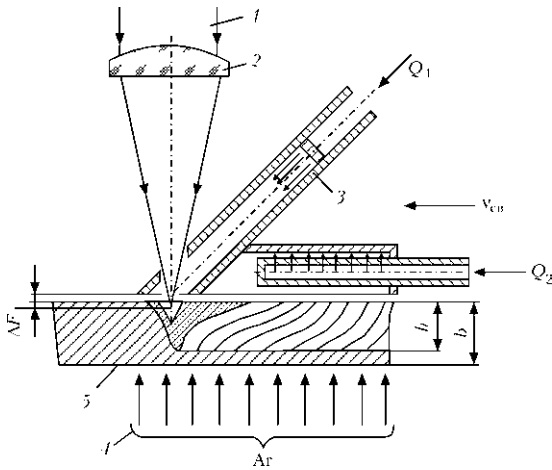


Рис. 3. Схема лазерной сварки с дифференцированной защитой сварочной ванны и остывающего металла ламинарными газовыми потоками

металла — аргон (расход $Q_2 = 12$ л/мин). По критерию полного проплавления металла с формированием узкого (0,5...1,0 мм) корня шва (мощность излучения $P = 4,0...4,3$ кВт) выбраны оптимальные параметры режимов сварки (табл. 2).

После сварки все образцы проходили рентгеноскопический контроль, который показал, что в металле швов, выполненных по оптимальной схеме и на оптимальных режимах, присутствуют только единичные поры (рис. 4, а). Отклонение от оптимальной технологии сварки приводит к появлению сплошной цепочки пор, расположенной по оси шва (рис. 4, б).

В металле швов, выполненных лазерной сваркой, исследовали содержание газовых примесей (табл. 3). Газовый анализ показал, что использование в качестве защитной среды гелия и аргона обеспечивает содержание кислорода, азота, водорода в металле швов на уровне основного металла, соответствует требованиям ГОСТ 19807–91 и ASTM, а для Т110 — ТУУ 27.4.05416923.071–2005.

Для снятия остаточных сварочных напряжений и стабилизации структуры осуществлен отжиг образцов при температуре 650...950 °С (в зависимости от марки сплава). Сварные соединения подвергали механическим испытаниям на растяжение и ударный изгиб в состоянии после сварки и отжига. Результаты механических испытаний представлены в табл. 4.

Таблица 2. Параметры режимов лазерной сварки

Материал	b , мм	P , кВт	$v_{св}$, м/ч	ΔF , мм
BT1-0	5,0	4,1	48	2,0
BT6	7,5	4,3	36	2,0
СП15	6,5	4,0	42	2,0
BT22	6,5	4,2	30	2,0
BT23	6,0	4,0	42	1,0
T110	7,0	4,0	42	2,0

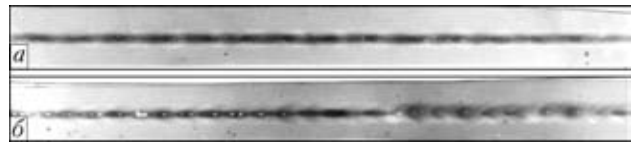


Рис. 4. Рентгенограммы сварных соединений сплава BT6, полученных лазерной сваркой на оптимальном (а) и неоптимальном режимах (б)

Таблица 3. Содержание (мас. %) газовых примесей в швах, выполненных лазерной сваркой

Материал	O ₂	N ₂	H ₂
BT1-0	0,12	0,040	0,012
	0,13	0,041	0,011
BT6	0,15	0,050	0,013
	0,10	0,045	0,011
BT22	0,18	0,050	0,014
	0,17	0,050	0,012
BT23	0,17	0,045	0,017
	0,20	0,050	0,016
СП15	0,14	0,043	0,016
	0,13	0,041	0,015
T110	0,15	0,060	0,013
	0,12	0,045	0,013

Примечание. В числителе приведено содержание газовых примесей в шве, в знаменателе — в ЗТВ.

Высокие показатели механических свойств, удовлетворяющие требованиям нормативных документов, имели сварные соединения технического титана BT1-0 и сплава BT6, полученные лазерной сваркой. Коэффициент стабильности β -фазы сплава BT6 составлял 0,3. Сварные соединения сплавов с коэффициентом стабильности β -фазы 0,6 и выше (СП15, BT23, T110, BT22) проявили высокую чувствительность к термическому циклу

Таблица 4. Механические свойства соединений титановых сплавов, выполненных лазерной сваркой

Материал	Сварное соединение			Основной металл	
	σ_B , МПа	KCV , Дж/см ²		σ_B , МПа	KCV_{2} , Дж/см ²
		Шов	ЗТВ		
BT1-0	460	140	130	460	150
	440	150	145		
BT6	1010	30	34	980	45
	980	35	38		
СП15	1040	12	18	1030	43
	1030	19	30		
BT23	1050	8	9	1050	31
	1020	16	21		
T110	1080	12	19	1100	38
	1050	13	20		
BT22	1070	8	11	1050	30
	1040	9	12		

Примечание. В числителе приведены данные, полученные после сварки, в знаменателе — после отжига.



Рис. 5. Микроструктура металла швов сварных соединений титановых сплавов, выполненных лазерной сваркой: а — ВТ6 (Х200); б — ВТ23 (Х400); в — Т110 (Х400)

Таблица 5. Механические свойства сварных соединений титанового сплава ВТ6, полученных различными способами сварки

Способ сварки	σ_B , МПа	KCV, Дж/см ²		Место разрушения
		Шов	ЗТВ	
АДС	940	33	34	Шов
ЭЛС	970	34	31	ЗТВ
Лазерный	980	35	36	» »

Примечание. Механические свойства основного металла: $\sigma_B = 998$ МПа; $\sigma_{0,2} = 970$ МПа; $\delta = 12$ %; $\psi = 24$ %; KCV 42 Дж/см².

Таблица 6. Склонность сварных соединений сплава ВТ6 к коррозионному растрескиванию под напряжением

Способы сварки	№ образца	Время до появления коррозионной трещины, ч	Общее время исследований, ч	Место разрушения
Основной металл	1	Не выявлено	790 (воздух)	Без разрушений
	2	»	790	
	3	»	790	
	4	»	790	
	5	»	790	
АДС	1	Не выявлено	790 (воздух)	»
	2	107	107	Шов
	3	Не выявлено	790	Без разрушений
	4	264	264	ЗТВ
	5	Не выявлено	790	Без разрушений
ЭЛС	1	»	790 (воздух)	»
	2	»	790	
	3	330	330	ЗТВ
	4	350	350	
	5	Не выявлено	790	Без разрушений
Лазерная сварка	1	»	790 (воздух)	»
	2	»	790	
	3	»	790	
	4	504	504	
	5	Не выявлено	790	

лазерной сварки. Как после сварки, так и после отжига структура металла шва и ЗТВ в этих сплавах мелкодисперсная, что обеспечило равнопрочность сварных соединений с основным металлом. Однако уровень ударной вязкости металла швов и ЗТВ высоколегированных титановых сплавов был неудовлетворительным как после сварки, так и после отжига.

Если металл сварного шва и ЗТВ сварного соединения ВТ1-0 и ВТ6, выполненного лазерной сваркой, отличается грубоигольчатой структурой (рис. 5, а), то аналогичные зоны сварных соединений высоколегированных сплавов имеют очень дисперсную внутризеренную структуру (рис. 5, б, в). Эти структурные отличия являются одной

из причин существенного снижения ударной вязкости высоколегированных сплавов по сравнению с техническим титаном ВТ1-0 и сплавом ВТ6, в которых при разрушении путь трещины извилистый. В высоколегированных сплавах с дисперсной структурой трещины распространяются по траектории, близкой к прямолинейной, на что требуется меньше энергии, чем в случае ВТ1-0 и ВТ6 [8].

В дальнейшем целесообразно провести усовершенствование технологии лазерной сварки высоколегированных титановых сплавов параллельно с поиском оптимальных режимов термической обработки сварных соединений, выполненных лазерной сваркой, с целью повышения их пластических характеристик.

Значительный интерес представляло сравнение результатов исследований соединений сплава ВТ6, полученных лазерной и другими способами сварки. Для этого параллельно со сварными соединениями сплава ВТ6, полученными лазерной сваркой, исследовали соединения этого сплава, полученные аргонодуговой сваркой (АДС) и ЭЛС [9, 10].

Стыковые соединения пластин сваривали на установке УЛ-144 для ЭЛС (энергоблок ЕЛА 60/60) и с помощью промышленного оборудования для АДС титана вольфрамовым электродом. В последнем случае использовали флюс марки АНТ-25А. В качестве защитного газа при лазерной сварке применяли гелий и аргон, а при АДС — аргон. Во всех случаях режимы сварки обеспечивали выполнение швов за один проход без разделки кромок и применения присадочной проволоки. Несмотря на то, что погонная энергия при лазерной сварке была меньше (2,43 кДж/см), чем при ЭЛС (3,11 кДж/см) и АДС (4,77 кДж/см) в 1,3...2,0 раза, показатели прочности сварных соединений имели незначительные отличия и были близкими по значению к аналогичным характеристикам основного металла (табл. 5). Ударная вязкость металла шва и ЗТВ составляла 70...80 % от КСУ основного металла, что во всех случаях удовлетворяло требованиям нормативных документов и технологических инструкций на титановый сплав ВТ6. Склонность сплава ВТ6 и его сварных соединений к коррозионному растрескиванию под напряжением определяли в растворе метилового спирта с добавлением 0,4 % соляной кислоты. Испытания проводили при комнатной температуре в течение 790 ч. Количество образцов в каждой партии составляло 5 шт. Один из них (контрольный) под № 1 в каждой партии (табл. 6), испытывали на воздухе, другие — в агрессивной среде. В соответствии со стандартом, если все образцы партии находились в коррозионной среде под напряжением в течение 100 ч и не растрескались, то сплав или сварное соединение считается стойким к коррозионному растрескиванию под напряжением. Результаты коррозионных испытаний соединений сплава ВТ6, представлены в табл. 6. Анализ полученных результатов показал, что соединения сплава ВТ6, полученные различными способами сварки по оптимизированным технологиям, отличаются стойкостью к коррозионному растрескиванию.

Выводы

1. Выбраны оптимальные схемы защиты металла шва и состав защитной среды при лазерной сварке титановых сплавов, а для технического титана ВТ1-0 и сплава ВТ6 — оптимальные режимы лазерной сварки. Определено, что при лазерной сварке технического титана ВТ1-0 и сплава ВТ6 для защиты металла шва необходимо применять гелий, а для корня шва и остывающих участков основного металла — аргон.

Optimum scheme of gas shielding in laser welding was selected, allowing producing joints of VT1-0, VT6, VT22, VT23 and T110 alloys. Feasibility of laser welding of low- and medium-alloyed alloys has been established. It is shown that it is necessary to improve the technology of laser welding for high-alloy titanium alloys.

2. Прочность сварных соединений сплава ВТ6, полученных лазерной сваркой, находится на уровне основного металла, а ударная вязкость металла швов и ЗТВ составляет 70 % от КСУ ОМ.

3. Сварные соединения сплава ВТ6, полученные по усовершенствованным технологиям АДС по флюсу, ЭЛС, лазерной сварки, отвечают требованиям нормативных документов и являются стойкими к коррозионному растрескиванию под напряжением, хотя их коррозионная стойкость уступает основному металлу.

4. Необходимо дальнейшее усовершенствование технологии лазерной сварки и оптимизация режимов термической обработки сварных соединений высоколегированных титановых сплавов.

Авторы статьи выражают благодарность д-ру техн. наук С. Г. Полякову и сотрудникам его отдела за консультации и проведение работ по исследованию коррозионной стойкости под напряжением сварных соединений титанового сплава ВТ6.

1. *Металлургия* и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блащук и др. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
2. *Электронно-лучевая сварка* / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1987. — 255 с.
3. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
4. *Лазерная техника и технология*: В 7 кн. Кн. 5: Лазерная сварка металлов: Учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов / Под ред. А. Г. Григорьянца. — М.: Высш. шк., 1988. — 207 с.
5. *Сварные швы на стали и титане, выполненные лазером* / О. А. Величко, В. П. Гаращук, И. В. Молчан и др. // Автомат. сварка. — 1974. — № 10. — С. 19–21.
6. *Журов Н. В., Мильруд С. Р.* Некоторые технологические особенности лазерной сварки трубных соединений // Использование высококонцентрированных источников энергии в сварочном производстве: Материалы краткосрочного семинара, г. Ленинград, 20–21 дек. 1983 г. — Л.: ЛДНТИ, 1983. — С. 34–40.
7. *Замков В. Н., Прилуцкий В. П., Новиков Ю. К.* Достижения в области технологии сварки титана // Автомат. сварка. — 1993. — № 5. — С. 25–27.
8. *Титановые сплавы*. Металлография титановых сплавов / Е. А. Борисова, Г. А. Бочвар, М. Я. Брун и др. — М.: Металлургия, 1980. — 464 с.
9. *Замков В. Н., Прилуцкий В. П.* Технологические возможности АДС титана по флюсу // Актуальные проблемы сварки цветных металлов: Докл. I Всесоюз. конф. «Актуальные проблемы сварки цветных металлов», г. Киев, 21–23 нояб. 1978 г. — Киев: Наук. думка, 1980. — С. 300–301.
10. *Влияние* способа сварки плавлением на свойства соединений сплава Ti–6Al–4V / В. Н. Замков, В. П. Прилуцкий, И. К. Петриченко, В. Ф. Топольский // Автомат. сварка. — 2001. — № 4. — С. 3–7.

Поступила в редакцию 08.04.2009



ТИГ-СВАРКА ТОЛСТОЛИСТОВОГО ТИТАНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ФОРМИРУЮЩЕЙ ПОДКЛАДКИ

В. Ю. БЕЛОУС, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработан метод сборки под сварку в узкий зазор вольфрамовым электродом деталей из титановых сплавов толщиной 20...100 мм, который обеспечивает высокое качество сварных соединений, а также существенное снижение стоимости технологического процесса сварки. Сборка деталей под сварку осуществляется с применением формирующей подкладки, выполняющей функцию кристаллизатора при выполнении корневого прохода. Применение подкладок позволяет упростить подготовку кромок под сварку, сборку сварного соединения, а также сократить сварочные деформации.

Ключевые слова: дуговая сварка, узкий зазор, титан, вольфрамовый электрод, формирующая подкладка, управляющее магнитное поле

Сварка в узкий зазор — экономичный и эффективный способ соединения металла большой толщины. Факторами, наиболее важными при выполнении сварки титана и сплавов на его основе, являются снижение расхода присадочной проволоки, инертного газа и других сварочных материалов, трудоемкости подготовки кромок свариваемых деталей. Известным способом сварки титана является сварка в узкий зазор (СУЗ) вольфрамовым электродом [1], основными достоинствами которого являются малые ширина получаемого шва, объем наплавляемого металла, а также простота формы кромок под сварку. По этой технологии сборка деталей под сварку проводится с применением остающейся подкладки, которую вручную приваривают с обратной стороны детали [1]. Эта подкладка служит нижней стенкой разделки при выполнении первого прохода. В ряде случаев подкладку необходимо изготавливать из того же титанового сплава, что и основной металл. В дальнейшем приваренная остающаяся подкладка никаких функций не несет, но ее наличие затрудняет надежную защиту обратной стороны деталей от окисления воздухом при наплавке следующего слоя. После сварки приваренную подкладку, как правило, следует удалять. Кроме того, существенным недостатком данного способа сборки деталей под СУЗ применительно к титановым сплавам является то, что после удаления подкладки на изделии остаются поверхностные дефекты. Для их устранения необходимо частично удалять металл сопряженной поверхности сваренных деталей на глубину 1...1,5 мм.

Известен способ СУЗ титана с использованием U-образной разделки [2]. При этом корневого прохода заваривается без подачи присадочной про-

локи и без применения остающейся подкладки, однако при этом нивелируется такое преимущество СУЗ, как простота формы свариваемых кромок. Кроме того, в данном случае корневого прохода необходимо выполнять на специальных режимах, отличающихся от тех, на которых осуществляются последующие (заполняющие) проходы. Вместе с тем при сварке титана для защиты обратной стороны швов и прилегающих к ним нагретых участков сварного соединения от окисления применяют съемные медные подкладки с формирующими канавками и системой отверстий для подачи инертного газа [3]. Применяются также водоохлаждаемые накладки для уменьшения сварочных деформаций [4].

Проведены исследования, целью которых являлась разработка технологии СУЗ титана и титановых сплавов без применения остающихся подкладок. Для практического применения СУЗ целесообразно разработать технологию, предусматривающую выполнение корневого прохода на специальной съемной формирующей подкладке. Такая подкладка, наряду с защитой сварного соединения, должна нести функцию кристаллизатора для формирования валика корневого прохода.

Предлагаемая конструкция медной подкладки (рис. 1) имеет формирующую канавку, каналы для подачи защитного газа и снабжена водяным охлаждением. Применение охлаждения позволяет

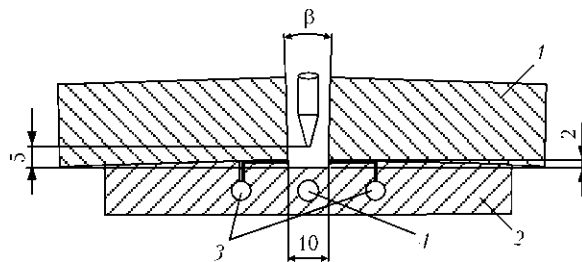


Рис.1. Схема сборки деталей под сварку: 1 — свариваемые плиты; 2 — формирующая подкладка; 3, 4 — соответственно отверстия для подачи защитного газа и протока охлаждающей воды

поддерживать стабильность теплового режима при выполнении всего прохода, уменьшать ширину ЗТВ. Формирующая подкладка обеспечивает защиту сварочной ванны, неплавящегося электрода, расплавленного металла и обратной стороны детали от контакта с воздухом.

Проведенные исследования показали, что для качественного выполнения второго прохода наплавленный слой металла первого, т. е. корневого прохода, должен удовлетворять следующим требованиям: иметь вогнутую форму поверхности; обратная сторона шва должна не иметь подрезов и несплавлений. Кроме того, после выполнения корневого прохода ширина зазора между боковыми стенками разделки должна быть не менее 10 мм.

Экспериментально выполняли сварку плит толщиной 40 мм из технического титана, листов толщиной 30 мм из титанового сплава ПТЗВ и толщиной 20 мм из титанового сплава ВТ23. Сварку выполняли вольфрамовым электродом марки ЭВИ-2 диаметром 5 мм в так называемый свободный зазор, т. е. отсутствовало жесткое закрепление свариваемых деталей, поэтому в процессе сварки происходило сокращение ширины разделки из-за поперечной усадки металла шва. Для снижения поперечной усадки применены П-образные выводные планки специальной конструкции (рис. 2) из сплава ВТ1-0, равные по толщине основному металлу, которые приваривали к свариваемым плитам. Начало и конец сварки проводятся на выводных планках. Возбуждение сварочной дуги происходит между вольфрамовым электродом и формирующей подкладкой, присадочная проволока подается после возбуждения дуги. В процессе сварки напряжение на дуге составляет 12 В и автоматически поддерживается системой АРНД, ток сварки 400...450 А. Расход защитного газа, проходящего через формирующую подкладку, незначительный — 4...10 л/мин.

Как показали проведенные исследования, предложенная конструкция формирующей подкладки обеспечивает качественную защиту зоны сварки и остывающего сварного соединения. Поверхность обратного валика блестящая, без побелости.

Для оценки качества защиты зоны сварки и металла шва корневого прохода, выполненного на формирующей подкладке, определяли содержание в нем остаточных примесей газов — кислорода, азота и водорода. Результаты исследований показали, что содержание газов в металле шва находится на уровне основного металла (таблица) и соответствует требованиям предельно допусти-

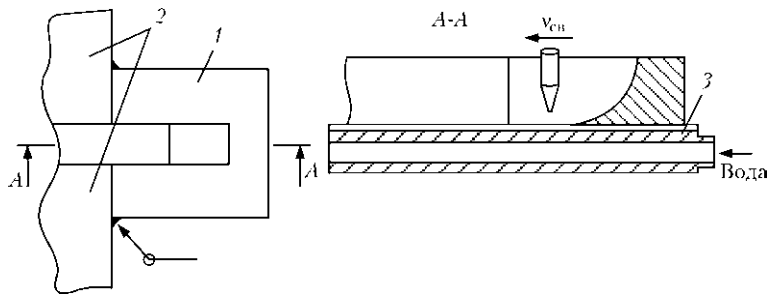


Рис. 2. Схема выполнения сварки с выводной планкой: 1 — выводная планка; 2 — свариваемые плиты; 3 — формирующая подкладка

Содержание примесей (газов) в металле, мас. %

Объект анализа	O	N	H
Основной металл ВТ1-0	0,07	0,024	0,0020
Присадочная проволока ВТ1-00св	0,06	0,016	0,0023
Металл корневого шва	0,06	0,020	0,0022

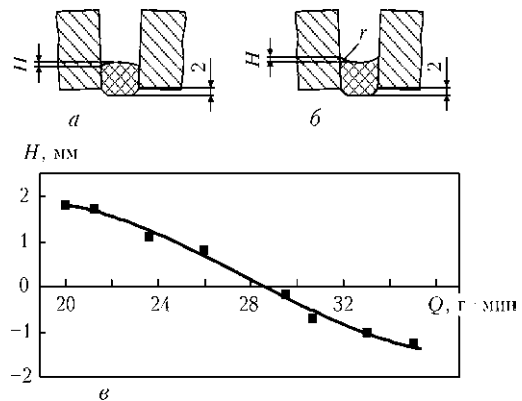


Рис. 3. Схема формирования первого прохода при удельной подаче присадочного металла менее 30 (а) и более 30 г/мин (б); зависимость высоты усиления шва H от удельного количества присадочного металла Q (в)

мого содержания примесей внедрения для технического титана.

Для разработки технологии выполнения корневого прохода необходимо исследовать процесс формирования сварных швов титана при СУЗ на медной водоохлаждаемой формирующей подкладке. Проведенные исследования показали, что при сварке на формирующей подкладке необходимо контролировать тепловложение в вертикальные противоположные свариваемые стенки. Для дозированного тепловложения применили магнитное управление сварочной дугой [5]. Перераспределение тепловой энергии дуги осуществляется поочередным принудительным отклонением дуги к противоположным боковым стенкам под воздействием внешнего управляющего магнитного поля, со значением поперечной составляющей магнитной индукции 8...12 мТл.

Исследования показали, что СУЗ на медной водоохлаждаемой подкладке сопровождается интенсивным теплоотводом из зоны сварки. Фор-

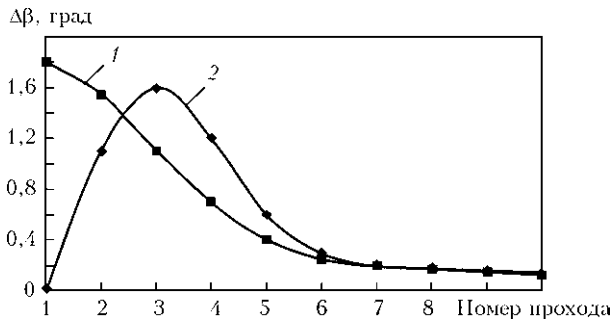


Рис. 4. Зависимость угловой деформации стыкового соединения от номера прохода при СУЗ с магнитоуправляемой дугой на остающейся (1) и формирующей (2) подкладке

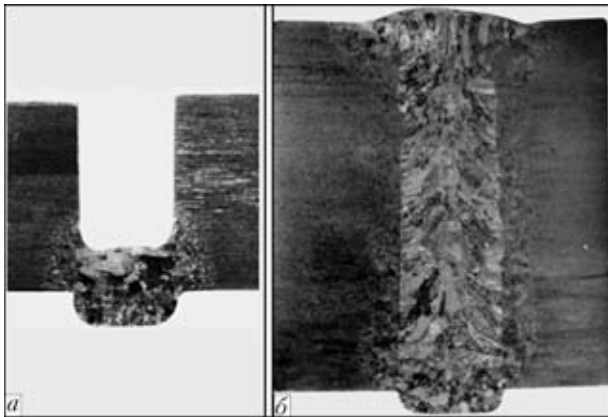


Рис. 5. Макрошлиф корневого прохода (а) и сварного соединения технического титана ВТ1-0 толщиной 40 мм (б)

мирование качественного валика корневого прохода с вогнутой поверхностью происходит при значительном объеме расплавленного металла — при удельной подаче присадочного металла в зону сварки более 30 г/мин (рис. 3). При меньшей удельной подаче присадочного металла формируется выпуклый валик, в результате чего при наложении последующего прохода в углах разделки образуются несплавления.

Особенностью сварки по предлагаемой схеме является то, что угловые деформации после первого прохода незначительны ($<0,1^\circ$). При СУЗ по схеме с остающейся подкладкой после выполнения первого прохода угловые деформации мак-

симальны и составляют $1,8^\circ$ (рис. 4). При СУЗ на формирующей подкладке максимальная угловая деформация сварного соединения отмечается после третьего прохода, а суммарное значение угловых деформаций после сварки на формирующей подкладке меньше по сравнению со сваркой с остающейся подкладкой. Особенностью сварных соединений, выполненных по разработанной технологии, является малая протяженность ЗТВ (рис. 5) и равномерное по высоте оплавление основного металла.

Выводы

1. Предложена и разработана технология сборки и сварки в узкий зазор деталей из титановых сплавов на формирующей водоохлаждаемой подкладке, которая по сравнению с традиционной схемой сборки (с остающейся подкладкой) позволила отказаться от необходимости удалять после сварки приваренную подкладку.

2. Применение формирующей водоохлаждаемой подкладки позволяет отказаться от выполнения механической обработки поверхности сваренных деталей с обратной стороны.

3. При сварке на формирующей водоохлаждаемой подкладке угловые деформации после выполнения корневого прохода практически отсутствуют, а суммарное значение угловых деформаций после сварки меньше по сравнению со сваркой с остающейся подкладкой.

1. Paton B. E., Zamkov V. N., Prilutsky V. P. Narrow-groove welding proves its worth on thick titanium // *Welding J.* — 1996. — № 4. — P. 37–41.
2. Matsui S., Nakayama S., Sakurai T. Application of narrow gap GTA welding to various products. — Osaka: JWS, 1988. — P. 127–134.
3. *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов* С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блашук и др. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
4. Касаткин Б. С., Прохоренко В. М., Чертов И.М. Напряжения и деформации при сварке. — Киев: Вища шк., 1987. — 246 с.
5. Белоус В. Ю., Ахонин С. В. Влияние параметров управляющего магнитного поля на формирование сварных швов при аргонодуговой сварке титановых сплавов в узкий зазор // *Автомат. сварка.* — 2007. — № 4. — С. 3–6.

A method of assembly for tungsten electrode narrow-gap welding of titanium alloy parts (20...100 mm) thick was developed, which provides a high quality of welded joints, as well as an essential lowering of the cost of the technological process of welding. Part assembly for welding is performed with application of a forming backing, acting as a mould when making the root pass. Application of backing allows simplification of edge preparation for welding, assembly of welded joint, as well as reducing the magnitude of welding deformations.

Поступила в редакцию 14.05.2009

БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СТАЛЕАЛЮМИНИЕВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

А. С. ОРЫЩЕНКО, д-р техн. наук, Е. П. ОСОКИН, инж., В. И. ПАВЛОВА, канд. техн. наук, С. А. ЗЫКОВ, инж.
(ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург, РФ)

Приведены результаты работ по созданию сварных сталеалюминиевых корпусных конструкций с применением биметалла на основе судостроительной стали типа Д40 и алюминиевого сплава марки 1561. Показаны примеры новых технических решений по технологическому оформлению сталеалюминиевых соединений.

Ключевые слова: дуговая сварка, сталеалюминиевые конструкции, биметаллические переходники, сварные соединения, конструктивно-технологическое оформление, механические свойства

Анализ развития отечественного и зарубежного судостроения показал, что для изготовления морских и речных судов наряду со сталью все большее применение находят алюминиевые сплавы, которые обеспечивают судам снижение общей массы, понижение центра тяжести, а также другие преимущества — легкость, немагнитность, коррозионную стойкость и достаточно высокую прочность. Из алюминиевых сплавов изготавливают как корпусные конструкции, так и надстройки, рубки, мосты, кожухи дымовых труб, переборки, выгородки и др.

Соединения алюминиевых и стальных элементов могут быть клепаными или сварными. Клепаные соединения крайне трудоемки в исполнении, и, как показывает практика эксплуатации судов, недостаточно надежны и долговечны.

Наиболее применяемым способом сварки при изготовлении сталеалюминиевых конструкций является сварка плавлением с получением биметаллических соединений алюминий–сталь.

За рубежом в судостроении и судоремонте широко используется биметаллический материал на основе низколегированной стали и алюминиево-магниевого сплава толщиной 36...40 мм, получаемый с применением сварки взрывом. В частности, такой материал применяют на верфях фирмы «Sumitomo» (Япония), в странах бывшей Югославии, Польши, а также в военном судостроении США, Великобритании, Франции и других стран.

В России до конца прошлого века в связи с отсутствием отечественного судостроительного биметалла сварные соединения сталеалюминиевых судостроительных конструкций изготавливали с применением биметалла на основе нержавеющей аустенитной стали марки 10X18H10T и

алюминиевого сплава марки АМг6 толщиной 10...12 мм, освоенного в производстве ОАО «ВИЛС» для нужд авиационной промышленности [1]. Применение этого биметалла в судостроении ограничивалось, как правило, второстепенными и малонагруженными конструкциями, не участвующими в обеспечении общей прочности корпуса судна, в связи с чем к применяемой на судостроительных заводах технологии сварки плавлением биметаллических соединений не предъявлялись особые требования и она не усовершенствовалась на протяжении многих лет. Наиболее распространенным типом сталеалюминиевого соединения являлся вариант, в котором стальной слой биметалла приваривали внахлест угловыми швами к стальной палубе, а к алюминиевому слою биметалла приваривали втавр листовые конструкции из алюминиевых сплавов (рис. 1).

При приварке угловыми швами стального слоя биметалла к палубе, которая выполняется в нижнем положении, обязательными условиями являются недопустить образование дефектов на биметаллических кромках в виде расслоения, оплавление алюминиевого слоя или перемешивание

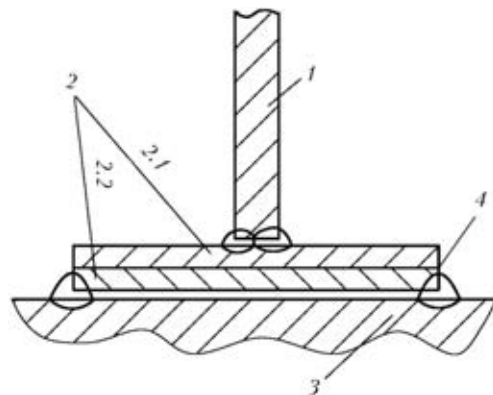


Рис. 1. Схема выполнения соединения алюминиевой конструкции со стальной, полученного с использованием переходного биметаллического элемента: 1 — алюминиевый сплав марки 1561; 2 — биметалл (2.1 — алюминиевый сплав марки 1560; 2.2 — аустенитная хромоникелевая сталь марки 10X18H10T); 3 — судокорпусная низколегированная сталь типа Д40; 4 — возможный очаг расслоения

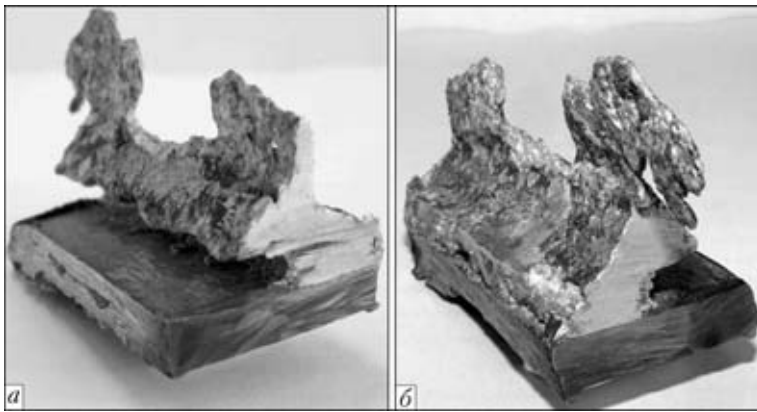


Рис. 2. Внешний вид фрагмента биметаллического соединения со стороны поверхности, контактировавшей с морской средой (а), и с противоположной (внутренней) стороны (б)

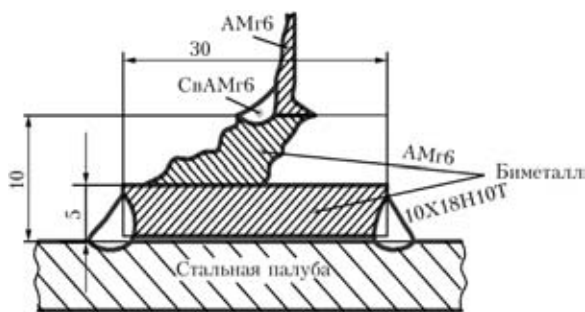


Рис. 3. Эскиз сварного биметаллического соединения после воздействия морской среды

расплавленных объемов разнородных металлов. Как свидетельствует практический опыт, выполнение указанного требования в реальных условиях сварки судостроительных конструкций чрезвычайно затруднено, в связи с чем происходит образование указанных выше дефектов, являющихся потенциальными очагами коррозионных повреждений, приводящих к разрушению сталеалюминиевого соединения.

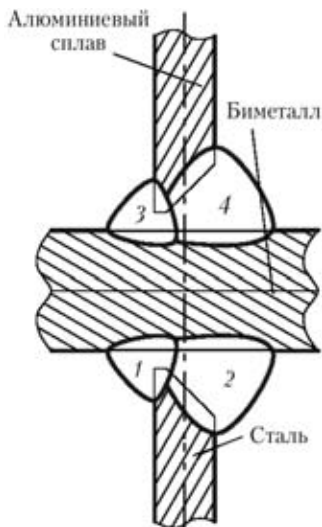


Рис. 4. Схема таврового соединения алюминиевой конструкции со стальной, полученного с применением биметаллических переходников: 1–4 — проходы при выполнении шва

На рис. 2 показан внешний вид характерного фрагмента сварного соединения алюминиевой стенки надстройки с алюминиевым слоем биметалла (сплав 1560–сталь 10X18H10T), а на рис. 3 представлен эскиз этого соединения после воздействия морской среды в процессе эксплуатации.

Как показывают результаты обследования судостроительных конструкций легких надстроек с палубой, подобные разрушения сварных сталеалюминиевых соединений происходят на фоне пониженной коррозионной стойкости в морской среде алюминиевого сплава марки 1560 (AMg6), особенно в сочетании его с высоколегированной сталью, благодаря возникновению существенной разности электродных потенциалов и приводят к необходимости полной замены биметаллических соединений.

Существующие способы сварки плавлением конструкций из стали и алюминиевых сплавов с применением биметаллических переходников наряду с нахлесточными предусматривают выполнение тавровых (крестообразных) узлов (рис. 4). Соединение получено сваркой стальных и алюминиевых элементов с соответствующими слоями биметалла втавр угловыми швами.

Анализ повреждений при испытаниях на усталость тавровых соединений крупномасштабной сталеалюминиевой конструкции показал, что наиболее слабыми местами являются стыковые швы биметаллических переходников (рис. 5).

Трещины усталости в условиях чистого изгиба в биметаллическом стыковом соединении, выполненном по ранее существовавшей технологии, образовывались уже при 10 тыс. циклов нагружения, что являлось следствием конструктивного непровара в центральной части биметаллического шва.

Из представленного выше очевидно, что существовавший технический уровень сварочного производства сталеалюминиевых соединений и



Рис. 5. Вид повреждения стыкового биметаллического шва при испытаниях на усталость крупномасштабной сталеалюминиевой конструкции

состав биметаллических переходников требовал конструктивных и технологических усовершенствований для обеспечения качества, надежности, коррозионной стойкости и эксплуатационной прочности нагруженных судостроительных конструкций [2].

Разработка нового судостроительного биметаллического материала. С целью повышения надежности и эксплуатационного ресурса сварных биметаллических узлов в составе корпусных конструкций надводных судов с развитой многоярусной алюминиевой надстройкой нашим институтом выполнен комплекс работ по созданию нового судостроительного биметалла и разработке новых конструктивных и технологических решений, связанных с изготовлением сварных сталеалюминиевых соединений.

В ЦНИИ КМ «Прометей» разработан судостроительный биметалл на основе низколегированной стали типа Д40 и алюминиевого сплава марки 1561, в котором в качестве технологической прослойки применяется технически чистый алюминий (сплав АД1) [3], что позволяет получить надежное сцепление алюминия со сталью и обеспечить высокий уровень прочности и технологичности биметалла (рис. 6).

Для изготовления биметалла используется способ совместной прокатки стальных и алюминиевых заготовок с однокомпонентным деформированием нагретого алюминиевого слоя. В процессе прокатки стальной слой практически не деформируется.

Основными причинами технологических трудностей получения качественного композиционного материала являются значительное отличие при прокатке сопротивления деформации стального и алюминиевого слоев, высокая склонность низколегированной углеродистой стали к окислению при нагреве, препятствующая образованию сталеалюминиевого соединения, а также возможность формирования хрупких интерметаллидных соединений на границе раздела слоев биметалла.

Технология получения биметаллического материала сталь–алюминий способом совместной горячей прокатки с однокомпонентной деформацией алюминиевого слоя заключается в следующем. После зачистки контактных поверхностей заготовки из алюминиевого сплава ее подвергают нагреву в электропечах до температуры 430...480 °С. Нагретые алюминиевые заготовки накладывают на зачищенные холодные стальные полосы и собранный пакет задают в валки прокатного стана, зазор между ними устанавливают равным конечной толщине биметалла. Прокатку пакета осуществляют за один проход с обжатием 50...80 %. При такой степени деформации алюминиевого слоя обеспечивается надежное сцепление соединяемых металлов. Толщина заготовки из алюминиевого сплава принимается ис-

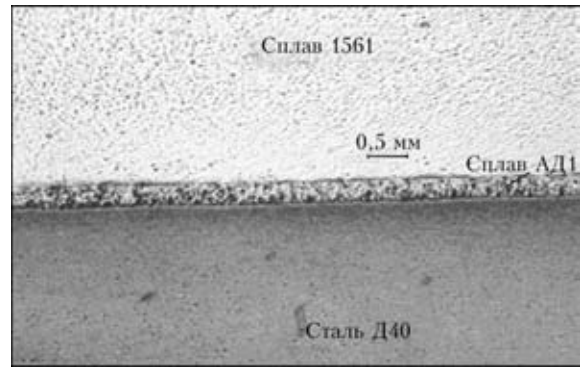


Рис. 6. Макроструктура (×10) слоистого композиционного материала сталь Д40–сплавы АД1 и 1561

ходя из условий обеспечения однокомпонентной деформации, захвата металла валками, энергосиловых возможностей прокатного оборудования и необходимой для надежного сцепления степени деформации.

Разработанный судостроительный биметалл на основе алюминиевого сплава марки 1561 и низколегированной стали типа Д40 выпускается в виде полос традиционного исполнения марки КБМ-1Т (алюминиевый сплав расположен по всей поверхности стального слоя) и комингсного исполнения марки КБМ-1К (алюминиевый сплав расположен в виде полосы шириной не менее 55 мм вдоль кромки на поверхности стального слоя).

Толщина биметаллической части равна — 100...130 мм, 8...12 мм (4...5 мм — слой стали, 4...7 мм — слой алюминиевого сплава), длина — (1800 ± 200) мм, ширина полос марки КБМ-1Т, для полос марки КБМ-1К — (165 ± 10) мм. Комингсный биметалл (биметаллический переходник с выступающим стальным слоем) представляет собой практически готовый конструктивный элемент с оптимальным соотношением толщины стального и алюминиевого слоев в зависимости от толщины стального комингса и стенки алюминиевой надстройки. Полученный биметалл одобрен Российским морским регистром судоходства. Прочность сцепления стального и алюминиевого слоев биметалла составляет на отрыв не менее 100 МПа; на срез — не менее 55 МПа.

Промышленное изготовление биметалла марки КБМ-1 освоено на производственном оборудовании ЦНИИ КМ «Прометей» и освидетельствовано Российским морским регистром судоходства.

Свариваемость судостроительного биметалла на основе низколегированной стали и алюминиевого сплава. Известно, что при нагреве выше критических температур на границе контакта алюминия со сталью образуются промежуточные интерметаллидные выделения, состав, форма и размеры которых определяются химическим составом исходных компонентов и температурно-временными условиями их взаимодействия. В зависимости от этих факторов вблизи контактной поверхности

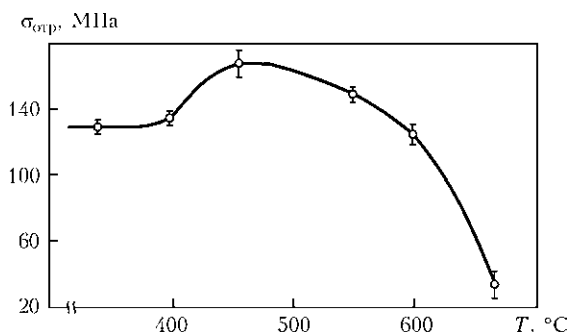


Рис. 7. Зависимость прочности сцепления слоев биметалла на отрыв $\sigma_{отр}$ от температуры нагрева

слоистой композиции могут происходить различные диффузионные процессы — самодиффузия элементов, атомная гетеродиффузия и реактивная диффузия с образованием новых фаз. Результат диффузионного взаимодействия всегда тесно связан с прочностными свойствами композиции.

Прочность соединения слоев различных металлов с разным характером физико-механического взаимодействия в условиях воздействия пластической деформации в значительной степени зависит от процессов массопереноса и образования химических соединений, а также от накопления структурных дефектов в приграничной зоне.

Экспериментальные исследования [4] показали, что прочность сцепления слоев сталеалюминиевого соединения после нагрева в твердом состоянии свыше 500...520 °С (в зависимости от температуры и продолжительности взаимодействия в условиях сварочного нагрева) может существенно снижаться в результате межфазного взаимодействия компонентов и образования на границе раздела интерметаллидных соединений переменного состава типа Al_mFen, сплошная прослойка которых по достижению критической толщины приводит к резкому снижению прочности (рис. 7).

Полученные экспериментальные результаты положены в основу разработки рационального технологического процесса сварки плавлением биметаллических материалов на основе низколегированной стали и алюминивно-магниевого спла-

ва применительно к судостроительным корпусным конструкциям.

Конструктивно-технологические варианты сварки биметаллических соединений. Повышение эксплуатационных качеств сварных биметаллических соединений, их надежности, долговечности, а также снижение трудоемкости изготовления неразрывно связано с совершенствованием конструктивных решений сталеалюминиевых узлов и технологии их выполнения. Совершенствование узлов сталеалюминиевых соединений стало возможным с использованием переходника в комингсном исполнении. В этом случае выступающий стальной слой биметалла, выполняющий роль комингса, присоединяется непосредственно к стальному корпусу, а алюминиевый слой биметалла — к алюминиевой стенке надстройки с помощью нахлесточных или стыковых соединений. Варианты типовых узлов соединений алюминиевых надстроек со стальным корпусом судна приведены на рис. 8.

Сравнительные технические характеристики рассматриваемых сварных биметаллических узлов (рис. 9) показывают, что применение биметалла в комингсном исполнении позволяет реализовать высокие значения статической и усталостной прочности при наименьших значениях металлоемкости сталеалюминиевых соединений и трудоемкости их изготовления.

Для решения проблемы повышения усталостной прочности сварных длинномерных биметаллических переходников разработана технология сварки и конструктивное оформление стыкового биметаллического соединения с полным проплавлением каждого из слоев, устраняющие внутренние непровары, а следовательно, концентраторы напряжений (рис. 10), что позволяет повысить их работоспособность до максимального уровня, лимитированного долговечностью сварных алюминиевых узлов [9].

Усталостная долговечность стыковых соединений биметалла с V-образной разделкой кромок (коэффициент асимметрии цикла $\rho = P_{\min}/P_{\max} =$

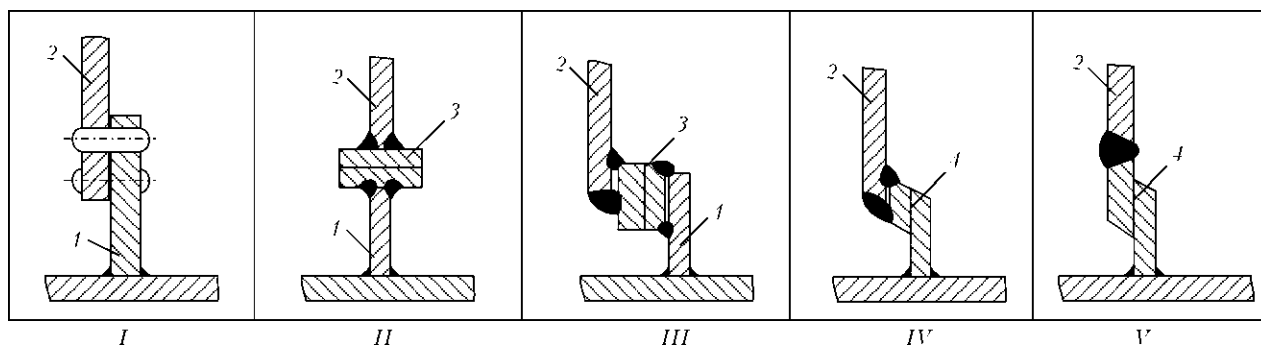


Рис. 8. Варианты типовых узлов соединений алюминиевых надстроек со стальным корпусом судна: I — клепаные узлы; II-V — сварные узлы с применением биметалла (II — тавровые; III, IV — нахлесточные; V — стыковые); 1 — стальной комингс; 2 — алюминиевая надстройка; 3 — традиционный биметалл; 4 — комингсный биметалл

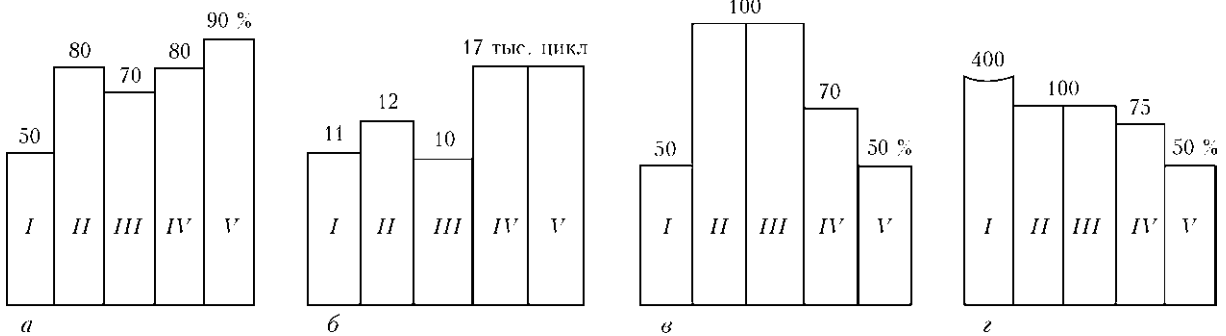


Рис. 9. Сравнительные технико-экономические характеристики типовых сварных сталеалюминиевых узлов: а — относительная статическая прочность $\sigma_{пр}^{св.соед}/\sigma_{в}^{Al}$; б — усталостная долговечность ($\sigma_{max} = 0,5\sigma_{пр}^{Al}$; $\rho = 0,3$; $\nu = 0,1$ Гц); в — относительная металлоемкость на 1 пог. м; г — относительная трудоемкость изготовления на 1 пог. м; I–V — то же, что и на рис. 8

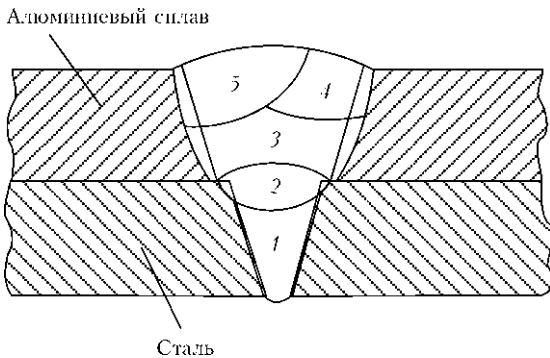


Рис. 10. Схема заполнения разделки свариваемых кромок биметаллического стыкового соединения: 1, 2 и 3–5 — проходы при выполнении соответственно стального и алюминиевого шва

$= 0,33$, где P_{min} , P_{max} — соответственно максимальная и минимальная нагрузка; частота нагружения $\nu = 10$ Гц на базе $2 \cdot 10^6$ цикл нагружения составляет не менее 100 МПа).

Таким образом, на основе новых технических решений по конструктивно-технологическому оформлению сталеалюминиевых соединений разработана технология сварки стыковых, тавровых и нахлесточных соединений с применением биметалла, что позволило создать надежные судостроительные конструкции, на 15...20 % повысить усталостную прочность сталеалюминиевых узлов, исключить использование дефицитных аустенитных сварочных материалов, обеспечить непрони-

цаемость стыковых соединений биметалла и коррозионную стойкость сталеалюминиевых соединений на уровне требований, предъявляемых к судокорпусным материалам.

Разработанные биметаллические соединения алюминий–сталь использованы для изготовления сталеалюминиевых конструкций в качестве переходных элементов при соединении стальной палубы и надстроек из алюминиевого сплава на этапах проектирования, строительства, ремонта и модернизации судов надводных различного назначения и малого водоизмещения (яхт, катеров, ботов, рыболовецких траулеров).

1. Рябов В. Р. Применение биметаллических и армированных сталеалюминиевых соединений. — М.: Металлургия, 1975. — 288 с.
2. Никитин В. А., Кальнин В. И., Щерблякин В. Г. Исследование прочности сварных узлов корпусных конструкций, изготовленных с использованием биметаллических планок // Судостроение. — 1991. — № 3. — С. 43–47.
3. Пат. 2061073 РФ, МПК 6 С 22 F 1/00, В 32 В 15/18. Способ получения биметаллов. — Опубл. 27.05.96.
4. Павлова В. И. Исследование процессов взаимодействия стали и алюминия и прочности их сцепления в слоистом материале под воздействием термического цикла сварки // Вопр. материаловедения. — 1998. — № 2 (15). — С. 12–29.
5. Пат. 2284252 РФ, МПК В 23 К 9/23, В 23 К 33/00, В 23 К 103/16. Способ сварки плавлением стыковых соединений биметалла на основе слоев из алюминиевых сплавов и стали или титана с одно- или двусторонними швами. — Опубл. 27.09.2006.

The paper gives the results of the work on development of welded steel-aluminium hull structures with application of a bimetal based on shipbuilding steel of D40 type and aluminium alloy of 1561 grade. Examples of new engineering solutions on technological design of steel-aluminium joints are given.

Поступила в редакцию 05.05.2009



ДЕФОРМАЦИОННЫЙ КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРОЧНЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКОЙ

В. А. ДЕГТЯРЕВ, канд. техн. наук, **Б. С. ШУЛЬГИНОВ**, д-р техн. наук
(Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины),

В. В. КНЫШ, канд. физ.-мат. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты испытаний на усталость сварных стыковых соединений после высокочастотной механической проковки с учетом различных технологий их подготовки. Показано, что одним из объективных методов оценки эффективности обработки сварных соединений является измерение глубины канавки зоны наклепа.

Ключевые слова: дуговая сварка, подготовка образца, сварное соединение, высокочастотная механическая проковка, глубина канавки, остаточные напряжения, кривая усталости, предел выносливости, долговечность

Необходимость повышения прочности и уменьшения вероятности разрушений машин и сооружений способствовала разработке большого количества способов упрочнения сварных соединений [1, 2] таких, как механическая зачистка шва, аргонодуговая обработка, обработка взрывом, виброобработка и другие способы обработки, основной целью которых является повышение их сопротивления усталости. Действие одних способов обработки направлено на уменьшение концентрации напряжений [3], других — на уменьшение остаточных напряжений растяжения [4]. Однако сложность прогнозирования циклической долговечности конструкций в связи с влиянием разных конструкционных и технологических факторов требует развития новых методов повышения прочности сварного соединения. В последнее десятилетие все большую актуальность приобретает высокочастотная механическая проковка (ВМП) вдоль линии сплавления металла сварного шва с основным металлом [5], которая характеризуется высокой эффективностью упрочнения разных типов сварных соединений при ее малой трудоемкости. Этот способ обработки достаточно хорошо изучен. Положительный эффект от его применения достигается за счет снижения концентрации напряжений в месте перехода шва на основной металл, деформационного упрочнения поверхностного слоя металла и создания остаточных напряжений сжатия в зоне концентратора.

В настоящее время актуальным остается контроль качества проковки, эффективность которой во многом зависит от выбранных инструмента и скорости обработки конструкций, эксплуатация

которых происходит в условиях циклического нагружения.

В работе [6], например, оптимальную скорость перемещения обрабатывающего инструмента оценивали по образованию в поверхностном слое изделия максимальных остаточных напряжений сжатия, полученных при скорости обработки 0,3...0,5 м/мин.

В исследованиях, проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона, эффективность ВМП оценивают по измерению твердости дна наклепанного слоя [7]. Установлено, что указанная твердость достигает максимального значения при скорости наклепа, равной 0,5 м/мин за четыре прохода, т. е. при скорости ВМП $v = 0,125$ м/мин, которая определяется как отношение длины наклепанного шва ко времени наклепа. Проведены сравнительные усталостные испытания разных типов сварных соединений в условиях асимметрии нагружения [8, 9], которые продемонстрировали эффективность ВМП с указанной скоростью. В работе [10] предложена скорость обработки 0,3...0,5 м/мин с визуальным контролем ее качества. В этом случае при качественно выполненной ВМП формируется канавка глубиной до 0,5 мм, с помощью которой устраняются острые подрезы.

В настоящее время ВМП осуществляется вручную посредством специального инструмента. Некачественно выполненная обработка может не обеспечить ожидаемого эффекта, поскольку все зависит от опыта работы с инструментом и правильного выбора скорости наклепа.

Цель исследований состоит в поиске простого и надежного критерия оценки эффективности ВМП, особенно на стадии эксплуатации сварных конструкций.

В настоящей работе влияние ВМП оценивали по результатам испытаний на усталость стыковых соединений низкоуглеродистой стали СтЗсп на установке ДСО-2 [11] при отнулевом цикле гармо-

нического нагружения в условиях изгиба. Образцы изготавливали из листовой стали толщиной 14 мм размером 40×400 мм. В ИЭС им. Е. О. Патона обработку зоны сплавления металла шва с основным металлом осуществляли посредством ультразвукового пьезокерамического инструмента USP-300 [12] с частотой колебаний 22 кГц, амплитудой колебаний торца волновода 19 мкм и потребляемой мощностью 0,3 кВт. Деформирующий механизм представлял собой специальную головку со встроенными в нее в один ряд четыре стальных стержнями диаметром 3 мм. При ВМП сварного соединения, если инструмент перемещать вдоль линии сплавления металла шва с основным металлом, образуется канавка шириной 3,0...3,5 мм и различной глубины h , зависящей от времени обработки, т. е. от скорости перемещения рабочего инструмента вдоль шва. Результаты испытаний образцов при напряжении от внешней нагрузки $\sigma_{\max} = 375$ МПа показали, что с увеличением глубины канавки их долговечность увеличивается (рис. 1). Причем между глубиной и долговечностью существует удовлетворительная корреляция. Начиная с глубины $h = 0,14$ мм, которая получена при обработке со скоростью 0,065 м/мин, трещины усталости в сварных образцах, испытанных на базе $N = 10$ млн цикл, не образовывались. Таким образом, на основе полученных результатов исследований можно заключить, что оптимальным режимом обработки стыковых соединений стали СтЗсп по критерию долговечности будет считаться такой, который обеспечит глубину канавки не менее 0,14 мм. В работах [7, 10] содержатся сведения о том, что при глубине канавки $h = 0,2...0,5$ мм после качественно выполненного упрочнения ВМП перенаклеп металла не происходит. Однако эти данные имеют справочный характер и не могут служить основой выбора критерия оценки повышения прочности сварного соединения.

Чтобы оценить эффективность ВМП с учетом разных технологий изготовления образцов и навыков работы с инструментом, проведены сравнительные испытания образцов трех серий.

Первая серия образцов ВМП не подвергалась, т. е. образцы находились в исходном после сварки состоянии. Испытывали по несколько образцов в основном на четырех уровнях напряжений. Образец считался разрушенным, если трещина усталости достигала длины 10 мм. Результаты испытаний образцов (светлые кружочки), обработанных методом наименьших квадратов, представлены на рис. 2, кривая 1. Предел выносливости составил 200 МПа.

Вторая серия образцов изготовлена из сварной пластины длиной 1000 мм и шириной 400 мм с предварительно проклепанным сварным швом. ВМП сварного шва была намеренно поручена не-

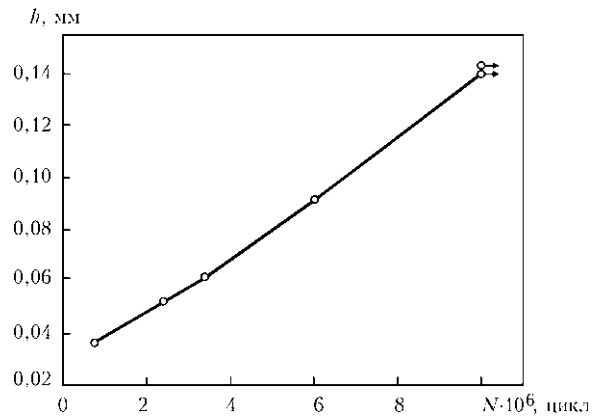


Рис. 1. Зависимость долговечности сварного образца из стали СтЗсп со стыковым швом от глубины канавки в зоне наклепа

обученному оператору, не имеющему опыта работы с инструментом, с целью проверки, как может повлиять выполненная неквалифицированным оператором ВМП сварных соединений на долговечность конструкций при их циклическом нагружении. После обработки пластину разрезали на образцы установленных размеров (40×400 мм). Результаты испытаний таких образцов представлены на рис. 2 темными и светлыми треугольниками. На рисунке виден существенный разброс значений долговечности. При визуальном осмотре установлено, что на некоторых образцах второй серии в зоне наклепа оставались несглаженные следы от бойков, имели место также наплывы металла. С целью анализа причин разброса результатов испытаний выполнены фотографии зон разрушения, из которых видно, что в некоторых образцах трещина усталости развивалась по дну наклепа (рис. 3) к краю и центру образца. Зарождение трещины происходило на расстоянии 5...7 мм от торца образца. После выхода трещины на край образца испытания прекращали. Анализ результатов испытаний таких образцов (светлые треугольники), обработанных методом наименьших квадратов (кривая 2 на рис. 2), показал, что ВМП повысила их предел выносливости на 36 %. В некоторых образцах конфигурация канавки была

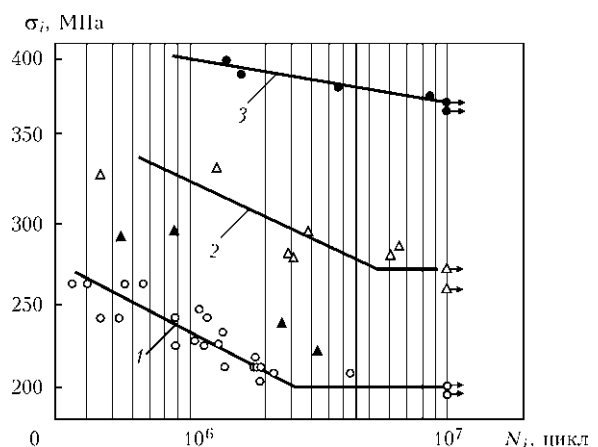


Рис. 2. Кривые усталости образцов стыковых соединений стали СтЗсп первой (1), второй (2) и третьей (3) серий

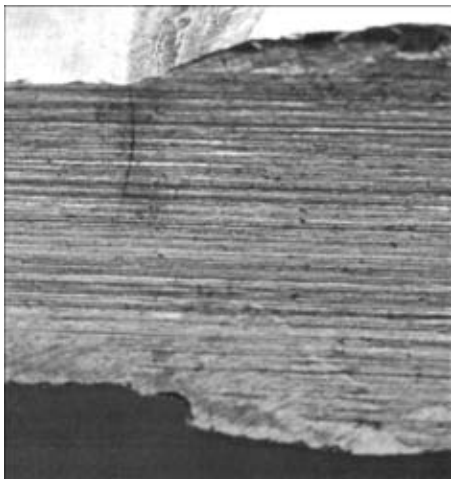


Рис. 3. Вид сбоку образца с трещиной усталости

неплавной, имелись характерные наплывы (гребешки) металла (рис. 4), которые образовались в результате некачественной проковки линии сплавления металла шва с основным металлом. В этом случае трещина усталости начинала развиваться не по дну наклепа, а из гребешков, которые стали источниками концентрации напряжений. На рис. 2 видно, что долговечность сварных образцов с такими дефектами в 3–4 раза меньше (темные треугольники). В результате повышение предела выносливости составило 11 %. Полученные результаты свидетельствуют о том, что отступление от оптимальных режимов обработки и недостаточная обученность оператора могут приводить к снижению качества наклепа, а следовательно, к существенному снижению эффективности проковки.

Третья серия образцов от второй отличалась порядком их подготовки. Предварительно сварную пластину разрезали на образцы. Затем каждый образец подвергали обработке со скоростью 0,065 м/мин при соблюдении всех норм выполнения технологии ВМП. Амплитуда колебаний торца волновода рабочего инструмента составляла 19 мкм. Такой порядок подготовки образцов позволил создать и сохранить остаточные напряжения сжатия. Измеренная глубина канавки зоны наклепа колебалась в пределах 0,14...0,16 мм, а ее ширина составляла примерно 3,0...3,5 мм. Результаты испытаний представлены на рис. 2 (кривая 3, темные кружочки). Предел выносливости сварных образцов после такой обработки составил 375 МПа, что на 87 % выше, чем у таких же образцов в исходном состоянии. Особенностью испытаний является то, что трещины усталости в образцах первой и второй серий зарождались на расстоянии 5...7 мм от края образца и распространялись одновременно к его краю и в центр; в образцах третьей серии трещина усталости зарождалась на таком же расстоянии от края образца и распространялась всегда к его краю. В образцах первой серии трещины усталости также возникали

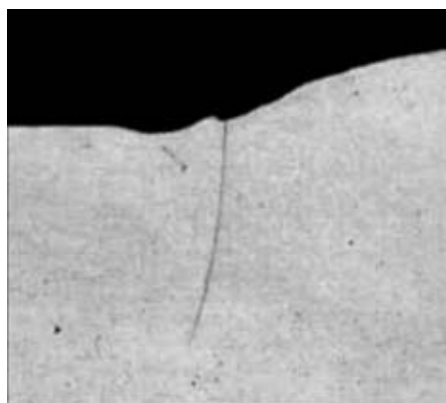


Рис. 4. Вид сбоку образца с трещиной усталости, образовавшейся в зоне напыла металла в результате отступления от технологии проковки сварного шва

в центре. Это подтверждает полученные ранее экспериментальные данные [7] о том, что в околошовной зоне соединения после ВМП остаточные напряжения сжатия увеличиваются в направлении к центру образца, на его краях их значения существенно уменьшаются. В образцах третьей серии эпюра напряжений сжатия, по-видимому, такая же, этим и объясняется наблюдаемая закономерность распространения трещины усталости. Разницу между пределами выносливости образцов второй и третьей серий можно объяснить, во-первых, качеством наклепа, а во-вторых, порядком изготовления образцов: порезка пластины на образцы в первом случае осуществлялась после наклепа, в результате чего произошла релаксация сжимающих остаточных напряжений.

Как показали результаты испытаний, скорость ВМП не может быть достаточным критерием качества обработки. Кроме того, проконтролировать ее в производственных условиях достаточно сложно. Поскольку после ВМП сварного соединения образуется канавка, зависящая от скорости перемещения рабочего инструмента вдоль шва, можно предположить, что ее глубина наряду с величиной измеренной твердости на дне канавки станут более объективным критерием эффективности ВМП сварных конструкций на стадии их эксплуатации или изготовления, чем скорость обработки.

Выводы

1. Долговечность сварного соединения, упрочненного технологией ВМП, зависит от глубины канавки, образуемой в зоне наклепа, поэтому одним из объективных критериев оценки эффективности упрочнения сварных соединений технологией ВМП (если ее нельзя оценить прямыми испытаниями на усталость) является измерение глубины канавки.

2. Предел выносливости сварного стыкового соединения стали СтЗсп после ВМП с рекомендованной скоростью 0,065 м/мин и образованием

канавки в зоне наклепа глубиной 0,14...0,16 мм повышается на 87 %. Нарушение технологии обработки может существенно снизить ее эффективность при эксплуатации сварного соединения в условиях изгиба, когда максимальные напряжения действуют на поверхности в зоне расположения характерных напылов металла по краю канавки. В исследуемых образцах это привело к повышению предела выносливости соединений всего на 11 %.

3. Эффективность повышения сопротивления усталости сварных соединений зависит как от выбранного режима ВМП, так и от профессионализма оператора, выполняющего обработку соединений. В связи с этим к выполнению работ по ВМП сварных швов должны допускаться операторы, прошедшие специальный курс обучения.

1. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. — Киев: Наук. думка, 1973. — 213 с.
2. Аснис А. Е., Иващенко Г. А. Повышение прочности сварных конструкций. — Киев: Наук. думка, 1978. — 193 с.
3. Лобанов Л. М., Кир'ян В. Л., Книш В. В. Підвищення ресурсу зварних металоконструкцій високочастотною механічною проковкою // Фізико-хім. механіка матеріалів. — 2006. — № 1. — С. 56–61.
4. Снижение остаточных сварочных напряжений УЗ обработкой / И. Г. Полоцкий, А. Я. Недосека, Г.И. Прокопенко и др. // Автомат. сварка. — 1974. — №5. — С. 74–75.
5. Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой (Озор) / Л. М. Лобанов, В. И. Кирьян, В. В. Кныш, Г. И. Прокопенко // Там же. — 2006. — № 9. — С. 3–11.
6. Остаточные напряжения при упрочнении сварных соединений стали ЮЗ ультразвуковым инструментом ударного действия / В. Г. Степанов, Е. Ш. Статников, М. И. Клестов, Е. М. Шевцов // Технология судостроения. — 1974. — № 7. — С. 32–34.
7. Книш В. В., Кузьменко А. З., Войтенко О. В. Повышение сопротивления усталости сварных соединений высокочастотной механической проковкой // Автомат. сварка. — 2006. — № 1. — С. 43–47.
8. Повышение сопротивления усталости сварных соединений конструкций ультразвуковой ударной обработкой / П. П. Михеев, Э. Ф. Гарф, А. З. Кузьменко и др. // Проблемы сварки и специальной электрометаллургии. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 41–47.
9. Кудрявцев Ю. Ф., Коршунов В. Ф., Кузьменко А. З. Повышение циклической долговечности сварных соединений ультразвуковой ударной обработкой // Автомат. сварка. — 1989. — № 7. — С. 24–28.
10. ЦП-0176. Рекомендації з огляду, підвищення та збільшення експлуатаційного ресурсу суцільноступінчастих зварних прогонових будов. — К.: Укрзалізниця, 2007. — 42 с.
11. Дегтярев В. А. Установки типа ДСО для испытаний на усталость при повторном ударном нагружении с различной асимметрией цикла // Пробл. прочности. — 1982. — № 10. — С. 110–113.
12. Пат. 47536 Україна. Пристрій для ультразвукової ударної обробки металів / Г. І. Прокопенко, Я. І. Клейман, О. В. Козлов та ін. — Опубл. 15.07.2002.

The paper gives the results of fatigue testing of butt welded joints produced by different joining technologies, after high-frequency mechanical peening. It is shown that measuring the depth of the peened zone groove is one of the objective methods of assessment of the effectiveness of welded joint treatment.

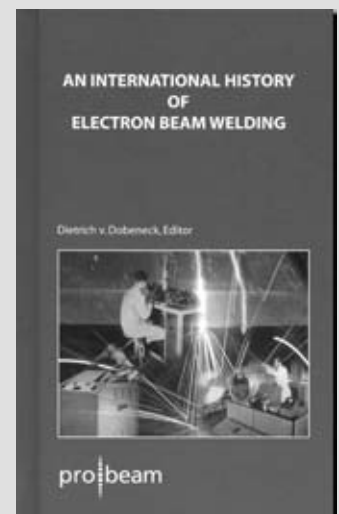
Поступила в редакцию 21.04.2009

Вниманию специалистов!

В Германии вышла в свет книга по истории электронно-лучевой сварки. В ее основу легли воспоминания авторитетных специалистов из шести разных стран, работавших и работающих сейчас в области электронно-лучевой сварки. Она раскрывает различные аспекты ее развития.

Здесь представлен личный опыт д-ра Стейгервалда (Германия) как изобретателя и предпринимателя, про которого сегодня сказали бы «получил начальный капитал от ангела-инвестора»; дана оценка техническим достижениям, описанная д-ром Сайе (Франция); рассмотрены особенности конкурентного развития электронно-лучевых компаний США (R. Bakish, D. Powers), которые сравниваются с плановой экономикой Советского Союза на примере шести промышленных комплексов, каждый из которых отвечает за определенный аспект целого (О. К. Назаренко); представлена также оценка лицензионных соглашений, начиная с Hamilton Standard до Nippon Electric Company (NEC) или Hawker Siddley, каждое с известными научно-исследовательскими организациями для продвижения технологий (Университет г. Осака в Японии и Институт сварки TWI в Великобритании); д-р Дитрих (Германия) описывает поколения от Zeiss через Hamilton Standard до Leybold/Heraeus и PTR. Д. В. Доченек обобщил информацию о деятельности во всем мире большинства университетов и компаний для того, чтобы сделать эту книгу наиболее полной.

В книге также раскрывается суть двух противоположных изобретений: д-р Стейгервалд проводил эксперименты с электронными микроскопами и открыл их потенциал для бурения и сварки. У него было решение и он искал применения. С другой стороны, перед д-ром Жак-Андре Стора стояла проблема, которую необходимо было решить: сварка химически активных материалов. Она требовала вакуумного процесса, и он нашел решение в электронно-лучевой сварке.





РАСЧЕТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ДВУХЧАСТОТНОМ СПЕКТРЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **И. Ю. РОМАНОВА**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрена методика расчетного прогнозирования долговечности сварных соединений при двухчастотном циклическом нагружении с применением гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений Пальмгрена–Майера. Показано, что данная расчетная методика позволяет получить соответствующие оценки долговечности соединений без дополнительных экспериментальных исследований.

Ключевые слова: циклическое нагружение, двухчастотное нагружение, расчетное прогнозирование долговечности, гипотеза линейного суммирования повреждений Пальмгрена–Майера

Современные сварные конструкции эксплуатируются в различных условиях. При этом имеющие место в них силовые нагрузки являются в большинстве случаев наиболее критичными с позиций ресурса безопасности эксплуатации. Усталостные разрушения сварных конструкций, связанные с переменными нагрузками, являются предметом исследований многих научных коллективов во всем мире [1, 2]. Наиболее изучено регулярное нагружение, которое характеризуется периодическим законом изменения нагрузки с одним максимумом и одним минимумом в течение одного периода при постоянстве параметров цикла напряжений в течение всего времени эксплуатации (испытания).

Применительно к сопротивлению усталости сварных соединений в условиях регулярного нагружения имеется большой объем экспериментальных данных и соответствующих обобщений [1, 2] и др. Особый интерес вызывают рекомендации относительно использования параметров сопротивления усталости при регулярном нагружении по произвольно заданному спектру (рис. 1) на основе использования гипотезы линейного суммирования повреждений Пальмгрена–Майера.

В соответствии с этой гипотезой доля повреждений при любом уровне амплитуды нагружения пропорциональна отношению количества циклов его действия n_i к предельному количеству циклов $[N_{fi}]$, что привело бы к разрушению, т. е. $D_i = n_i/[N_{fi}]$, где D_i — накопление повреждений при i -м режиме. Тогда в соответствии с гипотезой Пальмгрена–Майера это соотношение для спектра, представленного на рис. 1, можно записать в виде

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{[N_{fi}]}, \quad (1)$$

где k — количество режимов нагружения.

Рассмотрим применение этой гипотезы к случаю двухчастотного нагружения (рис. 2). Исследования показали, что при таком нагружении снижение сопротивления усталости происходит в гораздо большей степени, чем при одночастотном с максимальной амплитудой, равной суммарному значению амплитуд обеих составляющих цикла [1].

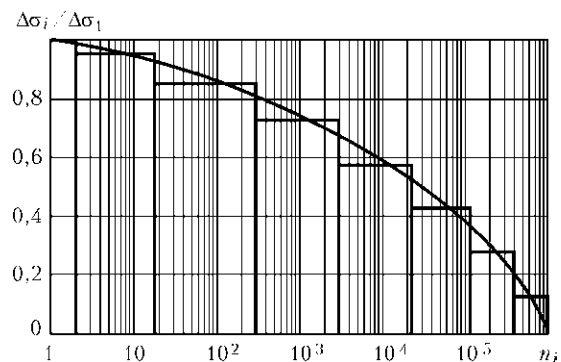


Рис. 1. Пример заданного спектра циклического нагружения $\Delta\sigma_i / \Delta\sigma_1 - n_i$

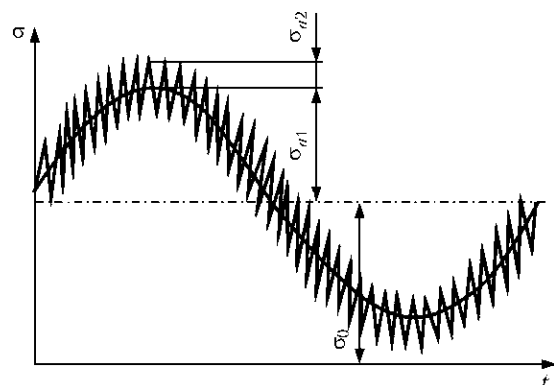


Рис. 2. Изменение напряжений при двухчастотном нагружении



В работе [1] для оценки долговечности при двухчастотном нагружении используются эмпирические соотношения, связывающие амплитуды напряжений σ_{a1} , σ_{a2} и долговечности $[N_1]$, $[N_2]$, где $[N_1]$, $[N_2]$ — соответственно низко- и высокочастотные нагружения. Чаще всего такие зависимости получают по экспериментальным данным.

В настоящей работе рассматривается возможность получения указанных зависимостей на основе гипотезы Пальмгрена–Майера.

Представим, что двухчастотное циклическое нагружение условно состоит из двух синусоидальных, периодически изменяющихся во времени t напряжений σ_1 и σ_2 , которые можно представить следующими уравнениями:

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \sigma_{a1} \sin \omega_1 t \text{ при } 0 \leq \omega_1 t \leq 2\pi, \quad (2)$$

где $\omega_1 t = 2\pi \frac{m}{M}$ ($0 \leq m \leq M$);

$$\sigma_2 = \begin{cases} \sigma_{a2} \\ 0 \text{ на участке } m, \dots, m+1, \\ -\sigma_a \end{cases} \quad (3)$$

где σ_0 — среднее значение напряжения низкочастотного цикла; M — количество интервалов, в пределах которых правомерны выражения (3).

Таким образом, для высокочастотного цикла для m -го интервала имеем

$$\begin{aligned} \sigma_{\max}^{(m)} &= \sigma_0 + \sigma_{a2} + \sigma_{a1} \sin 2\pi \frac{m}{M}, \\ \sigma_{\min}^{(m)} &= \sigma_0 - \sigma_{a2} + \sigma_{a1} \sin 2\pi \frac{m}{M}. \end{aligned} \quad (4)$$

Соответственно

$$R_m^{\text{в.ч}} = \frac{\sigma_{\min}^{(m)}}{\sigma_{\max}^{(m)}}, \quad \Delta\sigma_m = \sigma_{\max}^{(m)} - \sigma_{\min}^{(m)} = 2\sigma_{a2}.$$

Кроме того, на высокочастотный цикл нагружения $\sigma_{\text{в.ч}}$ накладывается низкочастотный $\sigma_{\text{н.ч}}$, при котором

$$\Delta\sigma_{\text{н.ч}} = 2\sigma_{a2}; \quad R_{\text{н.ч}} = \frac{\sigma_0 - \sigma_{a1}}{\sigma_0 + \sigma_{a1}}. \quad (6)$$

В процессе расчетов на базе долговечности N , соответствующей количеству циклов низкой частоты, получаем MN циклов. Спектр нагружения состоит из $M+1$ элементов. Допускаемое количество циклов для низко- и высокочастотной составляющих определяется из соотношения

$$\begin{aligned} [N] &= 5 \cdot 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma}{FATf(R_m)} \right)^{-5} \text{ при } [N] > 5 \cdot 10^6 \text{ цикл,} \\ [N] &= 2 \cdot 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma}{FATf(R_m)} \right)^{-3} \text{ при } [N] < 5 \cdot 10^6 \text{ цикл,} \end{aligned} \quad (7)$$

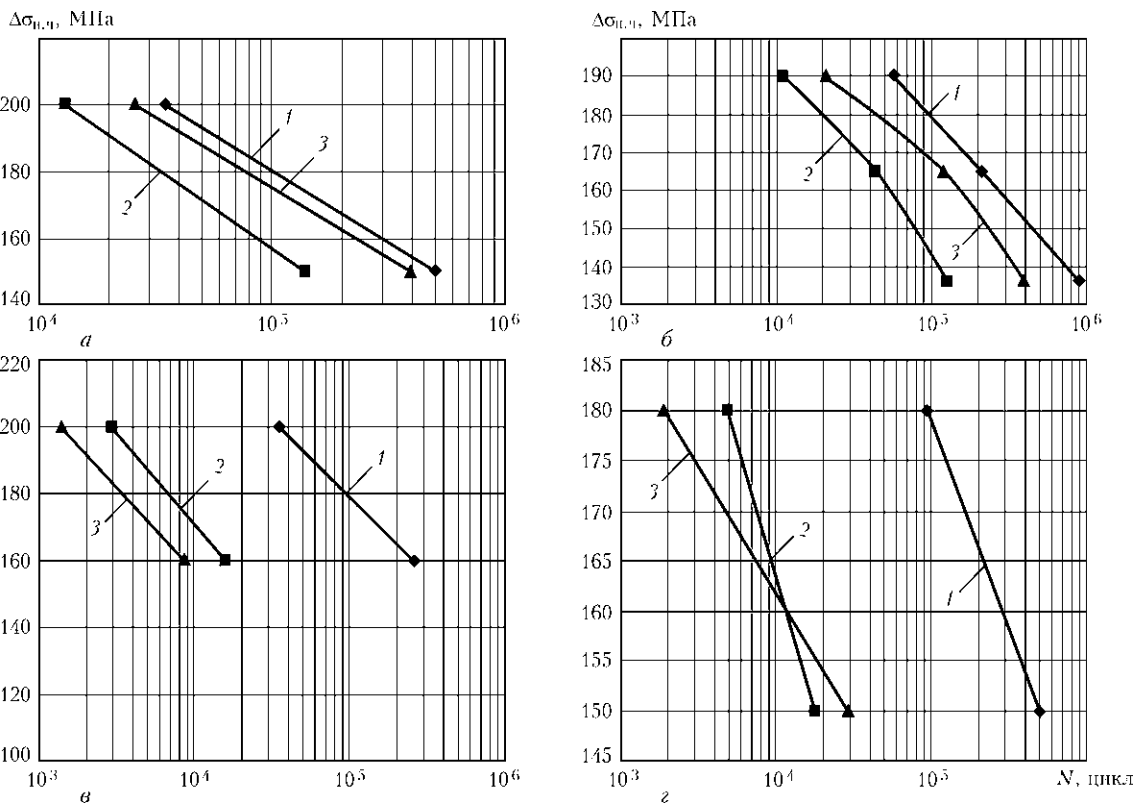


Рис. 3. Изменение долговечности при нагружении образцов из стали 22К при $M = 100$ (а, б) и 1000 (в, з): а — $\sigma_{a2}/\sigma_{a1} = 0,2$; б, в — 0,3; з — 0,4; 1, 2 — соответственно одно- и двухчастотное нагружение по [1]; 3 — расчетные данные, полученные на основе гипотезы Пальмгрена–Майера



где $f(R_m)$ определяется из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} f(R_m) &= 1,6 && \text{при } R_m \leq -1,0, \\ f(R_m) &= -0,4R_m + 1,2 && \text{при } -1,0 < R_m \leq -0,05, \\ f(R_m) &= 1,0 && \text{при } R_m > 0,5, \end{aligned}$$

$$m = 1, \bar{M}$$

FAT — характеристика соответственно для высоко- и низкочастотных составляющих, определяемая для данного сварного соединения по [2] на базе $N = 2 \cdot 10^6$ цикл либо из уравнений (7) при заданном значении долговечности при одночастотном нагружении [1].

Отсюда долговечность при двухчастотном нагружении составляет

$$N = \frac{1}{\frac{M}{\left(\frac{1}{[N_1]} + \sum_{m=1} \frac{1}{[N_{2m}]} \right)}} \quad (8)$$

В работе [1] представлены результаты испытаний образцов с геометрическим концентратором из стали 22К при двухчастотном нагружении. На рис. 3, а, б приведены соответствующие кривые изменения долговечности при одно- и двухчастотном нагружении образцов из стали 22К с концентратором напряжения при $M = 100$, где низкочастотная составляющая двухчастотного

нагружения соответствует отнулевому циклу, на рис. 3, в, г — то же, но при $M = 1000$.

Как видно из рис. 3, кривые усталости, характеризующие влияние двухчастотного нагружения при различных фиксированных значениях амплитудных и частотных соотношений, параллельны исходной кривой, соответствующей одночастотному нагружению. Повышение отношений амплитуд и частот ведет к смещению кривых в область меньшей долговечности. На рис. 3 также видна хорошая корреляция экспериментальных и расчетных данных.

Таким образом, применение гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений сварных соединений для случая двухчастотного нагружения позволяет использовать рекомендации работы [2] и получать для различных типов соединений (при различных FAT) соответствующие оценки долговечности, при этом дополнительные экспериментальные исследования не требуются.

1. *Прочность сварных соединений при переменных нагрузках* / Под ред. В. И. Труфякова. — Киев: Наук. думка, 1990. — 256 с.
2. *Recommendation for fatigue design of welded joints and components*. — S. l., [1996]. — 117 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1539-96/XV-845-96).

The method for calculation prediction of service life of welded joints under double-frequency cyclic loading by using the Palmgren-Maier hypothesis of linear summation of fatigue damages is considered. It is shown that this calculation method makes it possible to obtain appropriate estimates of service life of the joints requiring no additional experimental studies.

Поступила в редакцию 08.05.2009



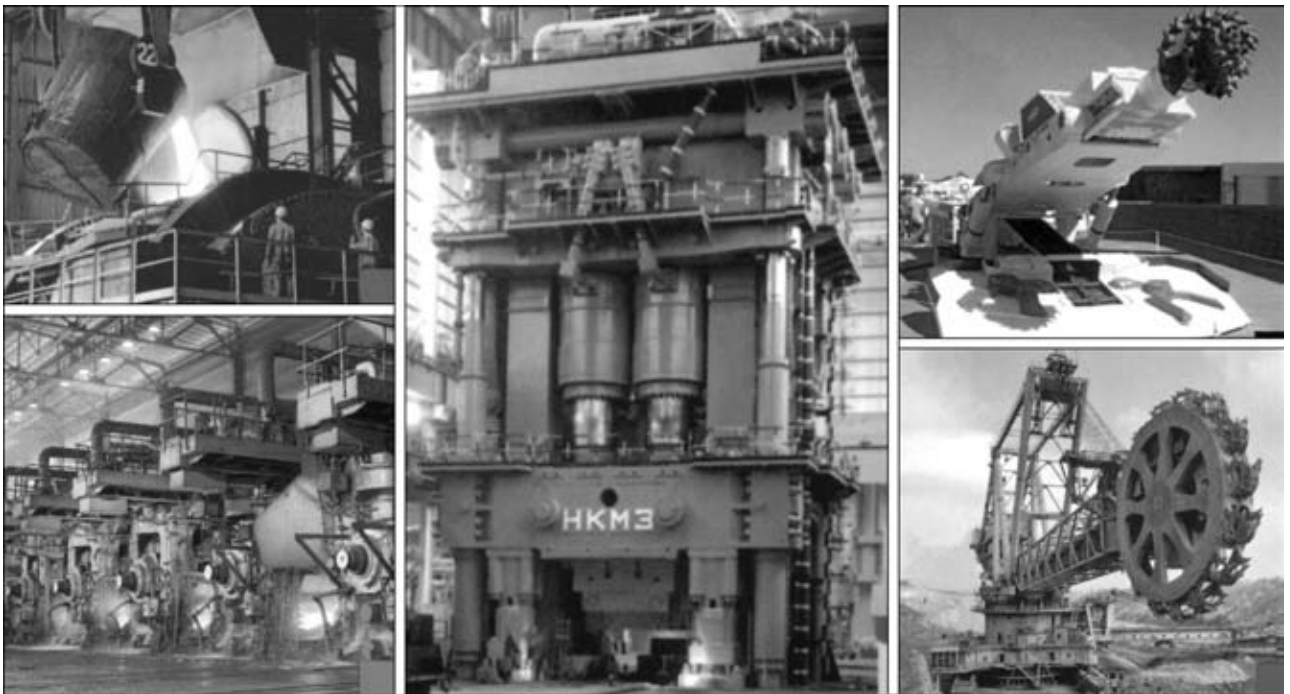
НОВОКРАМАТОРСКОМУ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМУ — 75

За 75 лет ЗАО «Новокраматорский машиностроительный завод» («НКМЗ») стало крупнейшим в мире предприятием тяжелого машиностроения, способным оснастить современным высокопроизводительным оборудованием практически любые отрасли промышленности по полному циклу производства: проектирование, изготовление, поставка, наладка, фирменное обслуживание выпускаемых агрегатов. Предприятие ежегодно наращивает объемы производства и постоянно расширяет рынки сбыта своей продукции, которая успешно эксплуатируется во

и электрошлаковой сварки (ЭШС), только за период 1951–1953 гг. завод в три раза увеличил выпуск сварных металлоконструкций.

Приятно сознавать, что ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины внес заметный вклад в достижения предприятия:

— в 1951 г. впервые в мире успешно внедрена однопроходная ЭШС металла толщиной 200 мм при изготовлении статоров гидротурбин. Применение различных методов ЭШС и специализированного сварочного оборудования обеспечили создание це-



многих странах на всех континентах земного шара.

Отрадно отметить, что практически все этапы развития завода базируются на современной стратегии удовлетворения потребностей мирового рынка в качестве ведущего производителя уникальной техники за счет эффективного использования интеллектуальных и технических возможностей. Особенно ярко это проявилось в тяжелые послевоенные годы, когда завод возглавил всесоюзное движение за перевод крупных литых заготовок на сварные. Решение этой задачи на заводе означало снижение трудоемкости на 50 %, длительности производственного цикла в два раза, расхода металла до 30 % при более низкой себестоимости продукции.

Успех достигался благодаря слаженной и самоотверженной работе заводчан и широкому привлечению работников науки. Творчески используя новые высокоэффективные способы и оборудование для механизированной электродуговой, контактной

лой гаммы уникальных агрегатов — прокатные станы, гидравлические штамповочные прессы усилием до 75 тыс. т, горизонтально-ковочные машины, молоты и др. В настоящее время на заводе выполнены уникальные прямолинейные швы заготовок толщиной 3500 мм, кольцевые швы цилиндров гидропресса наружным диаметром до 3000 мм и толщиной 430 мм. И это далеко не предел;

— широкое внедрение сварки в среде углекислого газа обеспечило высокий уровень механизации сварочных работ (до 60 %);

— в производственном цикле завода нашли свое место наплавка конусов и чаш засыпных аппаратов для доменных печей и других деталей;

— для расширения возможности сварки крупных цилиндрических заготовок внедрена технология и оборудование автоматической сварки под флюсом в узкощелевую разделку.

Эти и многие другие совместные работы позволили производить продукцию на уровне лучших мировых стандартов и успешно конкурировать с передовыми зарубежными машиностроительными фирмами.

Для многих сотрудников ИЭС им. Е. О. Патона «НКМЗ» был и остается родным и близким предприятием, на котором проведены совместные работы по внедрению новых способов сварки, сварочного оборудования, где росли и крепились деловые отношения и человеческая дружба.

В этом году свой 60-летний юбилей отмечает также отдел главного сварщика (ОГС) ЗАО «НКМЗ». Образование отдела способствовало становлению «НКМЗ» в качестве лидера всесоюзного отечественного машиностроения, много сделавшего для успешного восстановления народного хозяйства после Великой Отечественной войны. Оно было своевременным и эффективным как с точки зрения совершенствования организации сварочного производства завода, так и широкого привлечения, разработки и внедрения новейших достижений науки и техники, освоения прогрессивных технологий и сварочного оборудования.

На протяжении 60-ти лет деятельности ОГС между «НКМЗ» и институтом были установлены и постоянно поддерживаются добрые традиции творческого сотрудничества. Благодаря этому в хронологии важных событий деятельности сварочного производства завода отчетливо видна важная роль совместного внедрения и широкого применения новых механизированных способов сварки, наплавки и сварочного оборудования, многие из которых были созданы впервые в мире. Ярким примером этого является широкое и успешное внедрение электрошлаковых технологий на заводе, который был пионером использования, усовершенствования и дальнейшего развития ЭШС.

Сегодня ОГС ведет успешную производственную и научно-исследовательскую деятельность, готовит высококвалифицированных специалистов. Здесь выросли многие незаурядные организаторы и руководители машиностроительной отрасли производства, а также научные работники. ОГС постоянно поддерживает высокий производственный и научно-технический потенциал, решает на достаточном профессиональном уровне самые сложные задачи.

Институт электросварки им. Е. О. Патона
Редколлегия журнала «Автоматическая сварка»

УДК 621.791:002

ОТКРЫТИЕ МЕМОРИАЛЬНЫХ ДОСОК

28 сентября состоялось торжественное открытие мемориальных досок известным ученым в области технологии сварки и сварочного оборудования, заслуженным деятелям науки и техники Украины, бессменным членам редколлегии журнала «Автоматическая сварка» академиком Национальной академии наук Украины Владимиру Константиновичу Лебедеву и Даниилу Андреевичу Дудко.

На открытии присутствовали многочисленные ученики, коллеги, а также сотрудники института, родные и близкие. На митинге выступили академик

Б. Е. Патон, академики НАН Украины Н. В. Новиков, И. К. Походня, Б. А. Мовчан. Все выступившие отметили талант ученых, их незаурядные новаторские способности, энергию, заботу о подрастающем поколении, самоотверженность в труде.

Б. Е. Патон высказал пожелание, чтобы соратники, ученики и представители молодого поколения института продолжили славные начинания В. К. Лебедева и Д. А. Дудко и умножили их новыми достижениями.





МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА «НЕВА-2009»

С 22 по 25 сентября 2009 г. в Санкт-Петербурге в ОАО «ЛенЭкспо» прошла Десятая юбилейная международная выставка и конференция по судостроению, судоходству, деятельности портов, освоению океана и шельфа «НЕВА-2009». За прошедшее с 1991 г. время «Нева» вошла в четверку крупнейших мировых выставок. В мероприятиях выставки приняли участие более 600 фирм и предприятий из 37 стран мира.

Оптимистичный тон мероприятию задали и представители государственной власти России. Так, выступая на официальной церемонии открытия выставки, министр транспорта Игорь Левитин отметил положительную динамику прироста совокупного грузооборота портов России. Губернатор С.-Петербурга Валентина Матвиенко также рассказала участникам и гостям выставки об успехах города в области морской деятельности. Среди наиболее крупных петербургских проектов Губернатор выделила морской пассажирский порт «Морской фасад», в текущем году приступивший к активной работе.

Сварочная тематика была отражена в отдельном разделе выставки. Компания ESAB представила свои сварочные материалы: флюсы, проволоки, электроды, керамические подкладки, сварочные прутки. На стенде фирмы «Уралтермосвар» была организована демонстрация оборудования.

Внимание посетителей привлекли импортзамещающие низковольтные электроды для сварки нефтепроводов и газопроводов марки ЛЭЗ ЛБГп Лосиноостровского завода, которые по своим сварочно-технологическим свойствам и механическим характеристикам не уступают широко применяющимся в России импортным электродам марок LB52U (Япония) и ОК 53.70 (Швеция).

Компания «Мир сварки» продемонстрировала разработку для судостроительных предприятий — систему Offshore. Она представляет собой многопостовый источник (могут быть использованы выпрямители отечественного производства типа ВДМ-6303, ВДМ-1202С) и конвертор низкого напряжения, замещающий собой балластный реостат. Основные преимущества конвертора — возможность большого удаления от источника питания (до 200

метров), отсутствие взаимного влияния сварочных постов, малая масса и не большие габариты, малое энергопотребление. Компания «Северстальметиз» представила сварочные материалы: прутки, проволоки, штучные электроды и свою новинку — сварочную проволоку с химическим покрытием. Компания «Сизод» представила интересные системы, совмещающие в себе маску для сварщика и фильтр, который крепится на пояс сварщика.

24 сентября состоялась конференция «Сварка и сварочные технологии в судостроении, производстве морской техники и строительстве береговых объектов». Конференция была организована «Альянсом сварщиков Санкт-Петербурга и северо-западного региона» и проходила в два этапа. В первой половине дня доклады читались в одном из залов «ЛенЭкспо». Во второй половине дня конференция переместилась в «Центр технологии и судостроения и судоремонта», где участники прослушали оставшиеся доклады и приняли участие в открытии совместного Российско-Германского лазерного центра при ООО «ЦТСС».

В. В. Карпиков (ОАО СЗ «Северная верфь») в своем докладе «Подготовка кадров для судостроительной промышленности» отметил о необходимости создания учебного центра по подготовке рабочих сварочных профессий, которая возникла из-за недостаточного количества квалифицированных работников на рынке труда. Аттестация сварщиков проводится в соответствии со стандартом предприятия по аттестации сварщиков.

Сообщение В. В. Мурзина (С.-Петербургский государственный морской технический университет) было посвящено проблемам организации производственной практики студентов. Проведение практики при отсутствии финансирования порождает безответственное отношение к ее качеству и у предприятий, и у высших учебных заведений. В результате уровень практической подготовки студентов крайне низкий. Х.-Г. Гросс (SLV, Росток) сделал сообщение, посвященное европейской и международной системе сертификации сварки. Он отметил, что для продвижения в Европу любой продукции, включающей сварочные процессы, необходима их



сертификация, приемлемая для западного заказчика. Во время переходного периода такими сертификатами могут быть совместные сертификаты НАКС и DVS для предприятий России. В перспективе необходим переход от ГОСТов к системе ISO. Масштабность такого перехода подтверждает количество ежегодно аттестуемых сварщиков и предприятий в Германии, — 10000 и 380 соответственно.

В. Хельц (SLV, Ганновер) в своем докладе «Квалификация персонала для проведения подводной сварки в соответствии с международным стандартом ISO 15 618-1» осветил опыт подготовки водолазов-сварщиков в Германии. Обучение проводится в течение трех недель при наличии у слушателей сертификатов водолаза и сварщика (дуговая сварка), стоимость обучения составляет 5500 евро.

В докладе «Цифровой синтез — основа инновационных сварочных технологий» В. А. Хабужева (ООО «Лаборатория электронных технологий») предложен новый подход к производству сварочного оборудования, основанный на принципиальном разделении силовой (энергетической) составляющей сварочного оборудования, обеспечивающей дуговой процесс энергией, и информационной (цифровой), обеспечивающей законы управления током и напряжением в процессе сварки. Предлагаемая концепция производства оборудования прошла практическую проверку на предприятиях Санкт-Петербурга.

В докладе «Особенности сварки судовых трубопроводов из титановых сплавов» В. А. Семеновым (ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей») был сделан обзор применяемых технологий для сварки титановых трубопроводов. Основное условие получения качественных сварных швов при сварке титановых трубопроводов — это точное соблюдение всех технологических рекомендаций и требований по защите зоны сварки. Было отмечено, что титановые трубопроводы отработали 170 тыс. ч на атомных подводных лодках и атомных ледоколах.

И. М. Лифшиц (ЗАО «СВАМА») сделал доклад «Ижорские сварочные материалы для судостроительной промышленности». В докладе отмечено, что завод в настоящее время выпускает более 70 марок сварочных электродов и 30 марок плавящихся флюсов и продолжает осваивать и внедрять в производство сварочные материалы, разработанные в ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей». Сварочные материалы завода аттестованы по системе качества ISO-9000, бюро Веритас (BVQI). Получен также сертификат одобрения ABS (Американское бюро судоходства) на некоторые марки электродов. Потребителями продукции ЗАО «СВАМА» являются крупнейшие верфи России. Л. Н. Орлов (ООО «ТМ.ВЕЛТЕК») в докладе «Совершенствование механизированной сварки газозащитной порошковой проволоки малого диаметра» отметил, что анализ состояния сварки в мировом судостроении показывает, что

около 80 % всего объема сварочных работ выполняется механизированной сваркой в углекислом газе сплошной и порошковой проволоками диаметром 1,0...1,2 мм. В настоящее время потребности судостроения России и Украины удовлетворяются за счет импорта порошковых проволок ведущих мировых производителей: ESAB, Welding Alloys, Filarc, Cobelco, Hunday и др. В то же время производственные мощности предприятий-производителей порошковых проволок России и Украины позволяют полностью удовлетворить потребности судостроения в порошковых проволоках малого диаметра.

С. Ю. Максимов (ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ) в своем докладе «Ремонт судов на плаву с применением «мокрой» подводной сварки» отметил, что в институте разработаны специализированные сварочные материалы (электроды и порошковые проволоки), технология и оборудование для ремонта судов на плаву без постановки в док с помощью «мокрой» подводной сварки. Дана ретроспектива более 30 выполненных работ по ремонту кораблей в Балтийском и Мурманском бассейне.

В. В. Голиков (ООО «Спецподводремонт») в докладе «Подводно-технические работы при ремонте дефектов труб и сварных соединений в ООО «Спецподводремонт» привел обзор ремонтно-восстановительных работ, проводимых с помощью «сухой» гипербарической сварки в специализированном кессоне на крупнейших реках России, в том числе при восстановительных работах после аварии на Саяно-Шушенской ГЭС в августе 2009 г.

Как всегда интересное и содержательное сообщение сделал проф. П. И. Зайффарт (Ingenieurtechnik und Maschinenbau GmbH) «Широкое применение технологических лазеров в судостроении Германии». Докладчик выделил основные преимущества лазерной сварки по сравнению с дуговой: отсутствие правки и подгонки, высокая точность (предпосылка быстрой сборки и автоматизации) и производительность, уменьшение количества сварщиков. По проектам Ingenieurtechnik und Maschinenbau GmbH запущены цеха лазерной сварки для укрупнения полотнищ и приварки шпангоутов на верфях в Ростоке (2004, Германия), в Турку (Финляндия, 2006), в Монфальконе (Италия, 2008) и на ФГУП «Адмиралтейские верфи» (2009). Использование лазерной сварки позволило уменьшить время производства судов в два раза. Появление на рынке мощных волоконных лазеров (5 и более кВт) фирмы IPG открывает новые возможности массового применения лазерной сварки в судостроении (первый волоконный лазер мощностью 10 кВт был приобретен верфью в Ростоке в 2004 г).

В целом конференция обеспечила обмен полезной информацией, способствовала укреплению научного и делового сотрудничества.

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

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПАРК «ИЭС им. Е. О. ПАТОНА» СЕГОДНЯ

Технологический парк «ИЭС им. Е. О. Патона» создан в соответствии с Законом Украины «О специальном режиме инновационной деятельности технологических парков» № 9991-XIV от 16 июля 1999 г. по инициативе Национальной академии наук Украины на базе ведущей научной организации страны по сварке — ИЭС им. Е. О. Патона. Соответственно приоритетные направления деятельности технопарка учитывают как национальные инновационные приоритеты, так и научную специализацию института.

Основной функцией технопарка является поддержка инновационной активности фундаментальной, отраслевой науки и промышленных предприятий; информационное, организационное и научно-методическое сопровождение процессов создания и внедрения новшеств. Реальные условия украинской экономики на момент создания украинских технопарков исключали возможности получения из бюджета каких-либо стартовых инвестиций и прямой финансовой поддержки в ходе их деятельности. Поэтому экономической основой Технопарка ИЭС является специальный режим инновационной деятельности в виде налоговых и таможенных преференций, которые предоставляются участникам технопарка при выполнении зарегистрированных в установленном порядке инновационных проектов.

Юридически Технопарк ИЭС представляет собой договорное (без создания юридического лица) объединение участников, часть которых (органы управления технопарка, базовый академический институт и другие участники Научно-технического комплекса ИЭС) компактно расположены в г. Киеве, остальные — в пределах таможенной границы Украины. Подобное децентрализованное размещение участников технопарков, позволяющее значительно снизить первичные инвестиции, в последнее

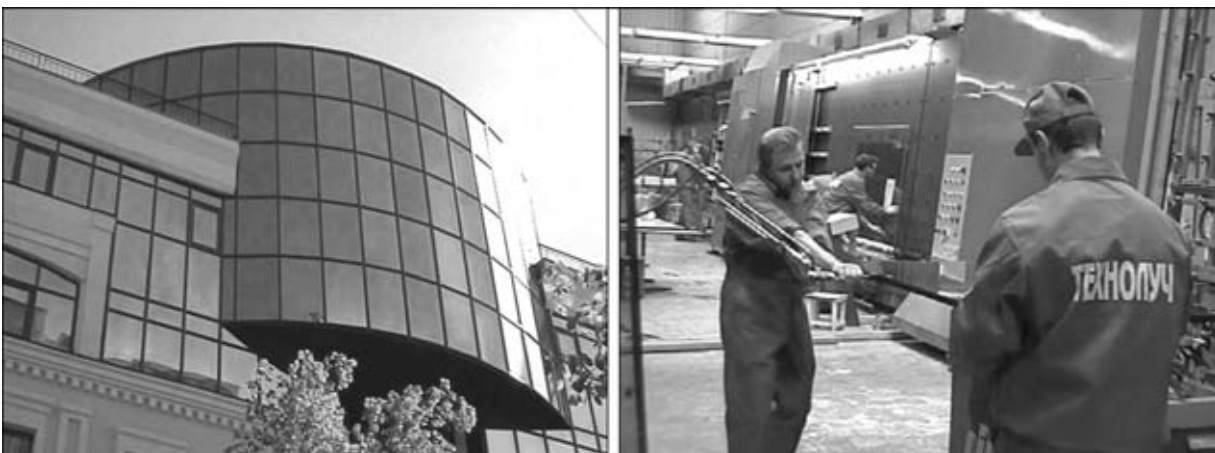
время находит все более широкое применение в мировой практике при создании так называемых виртуальных технопарков или технопарков без стен.

Высокая экономическая эффективность украинской модели позволяет обеспечить показатели, превышающие показатели традиционных технопарков. Например, в Китае считается нормальным, когда на 1 юань государственной поддержки технопарка выпускают 6 юаней инновационной продукции. Украинские технопарки за десять лет своего существования обеспечили на 1 гривну господдержки 18,5 гривни инновационной продукции.

За прошедший период участниками Технопарка ИЭС выполнен ряд инновационных проектов, получивших высокую оценку специалистов. Вот лишь некоторые из них:

машины для контактной стыковой сварки высокопрочных рельсов скоростных железных дорог, занимающие лидирующее положение на мировом рынке сварочной техники. Работа защищена 48 патентами ведущих стран мира. В первые же годы деятельности технопарка разработано и в сжатые сроки (1 год) изготовлено новое поколение рельсосварочного оборудования, защищенное патентами. Кроме предприятий Украины (было поставлено 16 комплексов), это оборудование успешно экспортировалось в Россию, США, Канаду, Австрию, Индию, Тайвань. Выигран тендер и осуществлена поставка крупной партии машин в Китай;

первая в мире высокочастотная сварка мягких тканей человека. На сегодня в Украине успешно прооперировано свыше 40 тыс. больных без сколько-нибудь серьезных послеоперационных осложнений. Работа защищена патентами Украины, США, Германии, Австралии, получила Государственную премию Украины (ИЭС);



Производство энергосберегающего стекла с использованием технологии магнетронного нанесения покрытий

не имеющий аналогов в мировой практике дуплекс-процесс выплавки высококачественных сварочных флюсов, который позволяет на 50 % заменить дефицитное сырье шлаковыми отходами отечественной металлургии. 70 % продукции идет на экспорт (Запорожский завод плавяных флюсов и стеклоизделий, ИЭС);

современное энергосберегающее оборудование для дуговой сварки, свыше 75 % которого идет на экспорт (Симферопольский завод сварочного оборудования «Фирма СЭЛМА», Опытный завод сварочного оборудования ИЭС).

В 2009 г. утвержден проект ИЭС и Запорожско-стеклофлюса по разработке и организации выпуска синергетических агломерированных флюсов. С Каховским заводом электросварочного оборудования ведутся работы по подготовке проекта «Создание и обеспечение выпуска комплекса отечественной путевой техники», что обеспечит условия для безаварийных железнодорожных перевозок на скоростях до 200 км/ч. Это является одним из требований для создания в Украине транзитного коридора «Восток–Запад».

Перспективными для проектов технопарка являются разработки ИЭС им. Е. О. Патона по созданию новых моделей камер для электронно-лучевой сварки, по применению современных методов контроля сварных швов и продлению срока службы ответственных сварных конструкций.

В заделе у участников Технопарка ИЭС имеются разработки, которые позволяют решать на высоком уровне важнейшие народнохозяйственные задачи, в том числе по утилизации опасных и высокотоксичных (в том числе медицинских) отходов, расширению применения сварки в медицине; созданию перспективных функциональных и конструкционных наноматериалов и покрытий, в том числе для аэрокосмической техники.

По оценкам экспертов проектам Технопарка ИЭС свойственна высокая степень новизны:

40 % проектов относятся к так называемым пионерским проектам, что означает линию на достижение мирового первенства;

30 % — «догоняющие» проекты, нацеленные на приближение к мировому уровню;

30 % — «модификационные» проекты, связанные с улучшением существующих процессов производства и выпускаемой продукции.

По технологическим укладам проекты Технопарка ИЭС относятся к III и IV укладу — по 30 % и к высшим V и VI укладам — по 20 %.

По значимости для рынков 40 % проектов Технопарка ИЭС имеют мировое значение, 40 % национальное и 20 % отраслевое. Для сравнения — в польских технопарках, работающих по стандартам ЕС, проекты мирового значения составляют 1,9, национального — 14 %. Большинство польских проектов являются догоняющими или модификационными и соответствуют III, IV укладам. Наличие в структуре института отдела экономических исследований и тесное сотрудничество со службами технопарка позволяет обеспечить эффективное научно-методическое сопровождение отделов-разработчиков и других участников технопарка при подготовке и выполнении инновационных проектов.

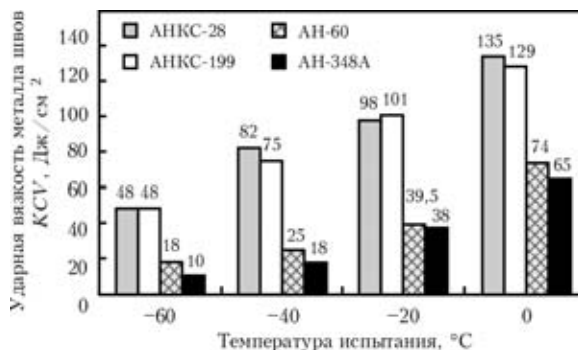
Десятилетняя практика работы Технопарка ИЭС показала, что государственная поддержка инновационных проектов в рамках технопарка, которая может составлять 5...15% всех затрат по проекту, не только делает реальным проведение инновационной деятельности при крайне ограниченных финансовых возможностях участников технопарка, но и в 2-3 раза ускоряет выполнение проектов.

А. А. МАЗУР, канд. экон. наук

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ АГЛОМЕРИРОВАННЫЕ ФЛЮСЫ ДЛЯ МНОГОДУГОВОЙ СВАРКИ

Для дуговых способов сварки используют флюсы, изготовленные по двум технологиям, которые имеют принципиальные различия, определяющие их характерные особенности. Плавяные флюсы в процессе изготовления доводятся до состояния плавления в газопламенных или электродуговых печах с последующей термической и механической обработкой полученного материала. Неплавяные (агломерированные, или керамические) флюсы в процессе изготовления не подвергаются термической обработке при температурах, равных или превышающих температуру плавления смеси шихтовых компонентов.

В области изготовления сварных конструкций наблюдается процесс постоянного роста доли использования низколегированных сталей повышен-



Ударная вязкость (KV) сварного металла шва. Основной металл сталь 10Г2ФБ+проволока Св-08Г1НМА

ной и высокой прочности взамен углеродистых сталей. Так, например, производители труб большого диаметра, предназначенных для строительства магистральных трубопроводов, освоили сварку труб из низколегированных сталей категории прочности X80 и в настоящее время ведут работы по подготовке к изготовлению труб из сталей категории прочности X100. Нормативная документация на трубы большого диаметра регламентирует требования к механическим свойствам сварных соединений не ниже уровня основного металла. Если свойства ЗТВ сварного соединения можно регулировать за счет управления термическим циклом сварки, то качество металла шва зависит в первую очередь от сочетания использованных сварочных материалов. В этой ситуации использование агломерированных флюсов, способных оказывать активное металлургическое влияние на затвердевающий металл сварочной ванны, не имеет альтернативы. Именно поэтому крупнейшие трубосварочные заводы Украины и России при освоении производства труб из низколегированных высокопрочных сталей предпочли технологию сварки под агломерированными флюсами.

До последнего времени отечественные предприятия выпускали исключительно плавные флюсы, технология изготовления агломерированных флюсов была освоена лишь в ограниченных объемах на Опытном заводе сварочных материалов ИЭС им. Е. О. Патона. Поэтому на трубосварочных заводах применяли агломерированные флюсы только зарубежных производителей. Понимая актуальность проблемы и идя навстречу отечественным потребителям, ОАО «Запорожстеклофлюс» совместно со специалистами ИЭС им. Е. О. Патона в кратчайшие сроки освоило производство агломерированных флюсов. При этом был использован многолетний опыт разработчиков в области создания сварочных флюсов и технологий их производства. Такой сплав науки и практики позволил создать новую технологию изготовления флюсов, которая соединяет преимущества плавных и агломерированных флюсов. В 2008 г. на заводе введена в эксплуатацию линия по производству агломерированных флюсов мощностью 5 тыс. т в год, освоено производство флюсов, предназначенных для многодуговой сварки низколегированных сталей категории прочности X70 и X80, для одно- и многопроходной сварки углеродистых и низколегированных сталей с пределом текучести до 420 МПа, а также

для наплавки износостойкого слоя твердостью до 250 НВ. Некоторые характеристики выпускаемых на заводе флюсов, полученные при испытаниях в соответствии с требованиями ДСТУ/ISO 14171, приведены на рисунке, иллюстрирующем показатели вязкости металла швов, полученных при многодуговой сварке низколегированной стали категории прочности X70.

Значительные объемы производства сварочных флюсов на ОАО «Запорожстеклофлюс», отработанная технология их изготовления с высоким уровнем энергосбережения, налаженные производственные связи позволяют заводу выпускать продукцию, которая по своим качественным показателям не уступает зарубежным аналогам, однако имеет более низкую отпускную цену.

О. Я. Осипов,
директор ОАО «Запорожстеклофлюс»

Флюс АНКС-199

ДСТУ / ISO 14171-A-S-46 3 AR S2Mo

Основность: В1 = 1,4; насыпная масса: 0,8...1,2 г/см³;
гранулометрический состав: 0,4...1,6 мм

Химический состав флюса, %

SiO ₂ +MnO	CaO+MgO	Al ₂ O ₃ +TiO ₂	CaF ₂
23-30	18-28	28-32	15-20

Химический состав наплавленного металла, мас. %

Проволока	Si	Mn	S
	не более		
Св-08Г1НМА	0,40	1,75	0,025

Механические свойства наплавленного металла

Проволока	Ударная вязкость KCV, Дж/см ² , при T, °C			
	-60	-40	-20	0
Св-08Г1НМА	48	75	101	129

Флюс АНКС-28

ТУ У 24.6-00293255-003:2007, ДСТУ / ISO 14171-A-S 50 4 AB S2Mo

Основность: В1 = 1,5; насыпная масса: 0,8...1,2 г/см³;
гранулометрический состав: 0,4...1,6 мм

Химический состав флюса, %

SiO ₂ +ZrO ₂	CaO+MgO	TiO ₂ +Al ₂ O ₃	CaF ₂
15-25	25-30	20-30	13-18

Химический состав наплавленного металла, мас. %

Проволока	Si	Mn	Mo	C	S	P
	не более					
Св-08Г1НМА	0,45	1,90	0,55	0,12	0,015	0,025

Механические свойства наплавленного металла

Проволока	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость KCV, Дж/см ² , при T, °C			
			-60	-40	-20	0
Св-08Г1НМА	680	27	48	82	98	135

ПОДПИСКА — 2010 на журнал «Автоматическая сварка»

Стоимость подписки через редакцию*	Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
	480 грн.	960 грн.	2100 руб.	4200 руб.	78 дол. США	156 дол. США

*В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Если Вас заинтересовало наше предложение по оформлению подписки непосредственно через редакцию, заполните, пожалуйста, купон и отправьте заявку по факсу или электронной почте.

Контактные телефоны: (38044) 287-63-02, 271-26-23; факс: (38044) 528-34-84, 529-26-23.

Подписку на журнал «Автоматическая сварка» можно также оформить по каталогам подписных агентств «Пресса», «Идея», «Саммит», «Прессцентр», KSS, «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).

ПОДПИСНОЙ КУПОН

Адрес для доставки журнала _____

Срок подписки с _____ **200 г. по** _____ **200 г. включительно**

Ф. И. О. _____

Компания _____

Должность _____

Тел., факс, E-mail _____



РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

Обложка наружная, полноцветная

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

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

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

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

Обложка внутренняя, полноцветная

Первая страница обложки (200×290мм) — 400\$

Вторая страница обложки (200×290мм) — 400\$

Третья страница обложки (200×290мм) — 400\$

Четвертая страница обложки (200×290мм) — 400\$

Внутренняя вставка

Полноцветная (разворот А3) (400×290мм) — 570\$

Полноцветная (200×290мм) — 340\$

Полноцветная (200×142мм) — 170\$

Реклама в разделе информации

Полноцветная (165×245мм) — 300\$

Полноцветная (165×120мм) — 170\$

Полноцветная (82×120мм) — 80\$

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу

- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу

- Статья на правах рекламы — 50% стоимости рекламной площади

- При заключении рекламных контактов на сумму, превышающую 1000\$, предусмотрена гибкая система скидок

Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрезки 200×290мм

- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5мм 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

- К файлам должна прилагаться распечатка (макеты в формате Word не принимаются)

Подписано к печати 08.10.2009. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 9,00. Усл.-отт. 9,60. Уч.-изд. л. 10,01 + 7 цв. вклеек. Цена договорная.

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



ГП «Опытный завод
сварочных материалов
ИЭС им. Е.О. Патона
НАН Украины»

**Производство материалов для
дуговой сварки, наплавки и резки:**

Электроды — АНО-4, АНО-4И, АНО-6, АНО-6У,
АНО-12, АНО-21, АНО-21М, АНО-21У, АНО-27,
АНО-36, АНО-37, МР-3, УОНИ 13/45, УОНИ 13/55,
ВН-48, АНО-ТМ, АНО-ТМ/СХ, АНО-ТМ60, АНО-ТМ70,
ТМА-1У, ТМА-3У, ЦУ-5, ТМУ-21У, ОЗЛ-6, ОЗЛ-8, ЦЛ-11,
ЭА-395/9, ЭА-400/10У, ЦЧ-4, Комсомолец-100,
Т-590, АНР-2

Порошковые проволоки — ПП-АН1, ПП-АН3,
ПП-АН7, ПП-АН19, ПП-АН19Н, ПП-АН24С, ПП-АН30,
ПП-АН59, ПП-АН61, ПП-АН63, ПП-АН67, ПП-АН68М,
ПП-АН69, ПП-АН70М, ПП-АНВ2У, ПП-НnX25П4Н3Т,
ППС-ЭК1, ППС-ЭК2, ППР-ЭК3, ППР-ЭК4

Флюсы плавные — по ГОСТ 9087-81, а также
АН-М13, АН-25, АН-72

Флюсы керамические — АНК-40, АНК-47А,
АНК-57, АНК-565

Возможно изготовление других марок материалов

04112, Украина	Тел.:	(044)	456-64-95
г. Киев-112			456-63-69
ул. О. Телиги, 2	Факс:	(044)	456-64-95
			456-63-08

HYUNDAI
WELDING CO., LTD.



Ваши надежные партнеры в мире сварки!



Официальный дилер "HYUNDAI Welding Co., Ltd." в Украине:
ООО "НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА "ЗНА"
ул. Антоновича (Горького), 69, г. Киев, 03150 (справки в Киеве и Харькове)
Тел. +38(044) 200-80-25, факс (044) 200-85-17
e-mail: zn@zn.com.ua
www.zn.com.ua

ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
СпецСплав

ПРОИЗВОДСТВО:

Флюсы сварочные

Проволоки порошковые для внепечной
обработки металлургических расплавов

Проволоки порошковые для сварки, наплавки,
напыления и металлплазми

Электроды наплавочные, специального назначения,
для сварки чугуна и резки

Ферросплавы и легатуры

Хром металлический

Комплексные раскислители и модификаторы

ул. Курسانова, 1
г. Днепродзержинск
49051, Украина

Тел.: (380562) 35-50-25
Тел./факс: (380562) 35-19-41
E-mail: zp@spetssplav.dp.ua

АББ - сердце робототехники

Робототехнические комплексы
для дуговой и контактной сварки



- Роботизация всего производственного цикла
- Роботизированные заводы "без людей"

АББ Лтд
Украина, 03038, Киев
ул. Гриценко, 2/1
Тел.: +380 44 495 22 11
Факс: +380 44 495 22 10
E-mail: robotics@ua.abb.com
www.abb.ua



С 1992 г. на рынке сварочного оборудования Украины



предприятие
«Триада-Сварка»
г. Запорожье

- Разработка и поставка автоматизированных сварочных комплексов
- Технологическое обеспечение и полная комплектация сварочных производств
- Ремонт сварочного оборудования, в т. ч. сложного
- Пуско-наладочные работы
- Широкий выбор сварочного оборудования




ABICOR BINZEL

Fronius

SELMA

тел. (061) 233 1058, (0612) 34 3623,
(061) 213 2269, 220 0079 e-mail: weld@triada.zp.ua
Сервисный центр: (061) 270 2939. www.triada-weld.com.ua



ОАО «ЗАПОРОЖСТЕКЛОФЛЮС»
69035, Украина г. Запорожье, ул. Диагональная, 2
Тел.: +380 (61) 289-03-53; факс: +380 (61) 289-03-50
E-mail: market@steklo.zp.ua

ОАО «Запорожский завод сварочных флюсов и стеклонзделей» на протяжении многих лет является одним из крупнейших в Европе производителей сварочных флюсов и силикатов натрия растворимого. На сегодня мы предлагаем более 20 марок сварочных флюсов.


На заводе разработана и внедрена Система управления качеством с получением сертификатов TUV NORD SERT на соответствие требованиям стандарта DIN EN ISO 9001-2000 и научно-технического центра «СЕПРОЗ» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины на соответствие требованиям ДСТУ ISO 9001-2001.

Благодаря тесному сотрудничеству с Институтом электросварки им. Е. О. Патона ОАО «Запорожстеклофлюс» освоил производство сварочных флюсов новым методом – двойным рафинированием сплава.

Сварочные флюсы для автоматической, полуавтоматической сварки и наплавки углеродистых и низколегированных сталей: АН-348-А, АН-348-АМ, АН-348-АД, АН-348-АП, АН-47, АН-47Д, АН-47П, АН-60, ОСЦ-45, АНЦ-1А, ОСЦ-45 мелкой фракции (ГОСТ 9087-81, ТУ У 05416923.049-99, ГОСТ Р 52222-2004).

Силикат натрия растворимый (модуль от 2,0 до 3,5). Широко применяется для изготовления жидкого стекла и сварочных электродов.

*МЫ ВСЕГДА ГАРАНТИРУЕМ СТАБИЛЬНОСТЬ ПОСТАВОК И САМЫЕ НИЗКИЕ ЦЕНЫ В СНГ
Наша цель — более полное удовлетворение Ваших потребностей в качественных и современных сварочных материалах.*




TBi Industries

**ГОРЕЛКИ
MIG /
MAG
и TIG
СВАРКИ**

**НЕМЕЦКОЕ
КАЧЕСТВО**

ПРЕДСТАВИТЕЛЬ В УКРАИНЕ - ЗАВОД  ДОНМЕТ
Краматорск Тел. (06264) 5-77-13, 4-26-85 E-mail: svarka@donmet.com.ua <http://www.donmet.com.ua>