



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор  
Б. Е. ПАТОН  
Ю. С. Борисов, Н. М. Воропай,  
В. Ф. Грабин, А. Т. Зельниченко,  
А. Я. Ищенко, И. В. Кривцун,  
С. И. Кучук-Яценко,  
Ю. Н. Ланкин,  
В. К. Лебедев (зам. гл. ред.),  
В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),  
Л. М. Лобанов, А. А. Мазур,  
В. И. Махненко, О. К. Назаренко,  
И. К. Походня, И. А. Рябцев,  
Б. В. Хитровская (отв. секр.),  
В. Ф. Хорунов, К. А. Юценко

МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Н. П. Алешин (Россия)  
Гуань Цяо (Китай)  
У. Дилтай (Германия)  
П. Зайфарт (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:  
И. С. Баташева, Л. Н. Герасименко,  
И. Р. Наумова, И. В. Петушков,  
А. И. Сулима

Свидетельство о государственной  
регистрации КВ 4788  
от 09.01.2001.

Журнал входит в перечень  
утвержденных ВАК Украины  
изданий для публикации трудов  
соискателей ученых степеней.  
При перепечатке материалов  
ссылка на журнал обязательна.  
За содержание рекламных  
материалов редакция журнала  
ответственности не несет.  
Цена договорная.

СОДЕРЖАНИЕ

НОВОСТИ ..... 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

*Махненко В. И., Миленин А. С., Семенов А. П.*  
Математическое моделирование термодеструкционных  
процессов при сваркопайке стыковых соединений типа  
титан-алюминий ..... 5

*Ищенко А. Я.* Сварка алюминиевых сплавов (направления  
исследований, проводимых в ИЭС им. Е. О. Патона) ..... 10

*Терновой Е. Г., Шулым В. Ф., Хаскин В. Ю., Шелягин В. Д.,  
Лозовская А. В., Сиора А. В., Бернацкий А. В.* Свойства и  
структура соединений алюминиевых сплавов, полученных  
гибридной лазерно-плазменной сваркой ..... 14

*Лабур Т. М., Ищенко А. Я., Таранова Т. Г., Костин В. А.,  
Григоренко Г. М.* Исследование характера разрушения  
сварных соединений высокопрочного сплава В96ц в  
условиях внецентренного растяжения ..... 21

*Жадкевич М. Л., Третьак Н. Г., Кавунович П. М., Зеленин В. И.,  
Мохорт В. А., Зеленин Е. В.* Сварка и наплавка трением с  
перемешиванием меди и ее сплавов ..... 28

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

*Ищенко А. Я., Подьяльников С. В., Покляцкий А. Г.* Сварка  
трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (Обзор) ..... 32

*Кныш В. В., Ковальчук В. С.* Повышение ресурса  
металлоконструкций из низколегированных сталей  
высококачественной механической проковкой после ремонтной  
сварки ..... 39

*Руденко П. М., Гавриш В. С.* Система автоматического  
управления и контроля процесса контактной точечной сварки  
КСУ КС 02 ..... 43

*Залевский А. В., Галинич В. И., Осипов Н. Я., Нетяга В. И.,  
Кириченко О. П.* Сварочно-технологические свойства нового  
флюса марки АН-47ДП ..... 46

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Разработки в области алюминиевых сплавов ..... 52

Диссертации на соискание ученой степени ..... 60

Патенты в области сварочного производства ..... 62

По зарубежным журналам ..... 64

ХРОНИКА

Международная научно-техническая конференция  
«Машиностроение и техносфера XXI века» ..... 66

Н. М. Воропаю — 70 ..... 67

П. В. Гладкому — 70 ..... 67

Б. Н. Кушниренко — 80 ..... 68

ИНФОРМАЦИЯ ..... 69

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief  
B.E.PATON

Yu. S. Borisov, N. M. Voropaj,  
V. F. Grabin, A. T. Zelnichenko,  
A. Ya. Ishchenko, I. V. Krivtsun,  
S. I. Kuchuk-Yatsenko,  
Yu. N. Lankin,  
V. K. Lebedev (vice-chief ed.),  
V. N. Lipodaev (vice-chief ed.),  
L. M. Lobanov, A. A. Mazur,  
V. I. Makhnenko,  
O. K. Nazarenko, I. K. Pokhodnya,  
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. Yushtina

*Electron galley:*

I. S. Batasheva, L. N. Gerasimenko,

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.

CONTENTS

NEWS ..... 3

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

*Makhnenko V. I., Milenin A. S., Semyonov A. P.* Mathematical model-  
ing of thermodeformational processes in braze welding of butt joints  
of titanium-aluminium type ..... 5  
*Ishchenko A. Ya.* Arc welding of aluminium alloys (trends of investiga-  
tions carried out at the E.O.Paton Electric Welding Institute) ..... 10  
*Ternovoy E. G., Shulym V. F., Khaskin V. Yu., Shelyagin V. D.,  
Lozovskaya A. V., Siora A. V., Bernatsky A. V.* Properties and struc-  
ture of joints of aluminium alloys produced by a hybrid laser-plasma  
welding ..... 14  
*Labur T. M., Ishchenko A. Ya., Taranova T. G., Kostin V. A.,  
Grigorenko G. M.* Investigation of fracture nature of welded joints of  
high-strength alloy V96tss under conditions of off-center tension ..... 21  
*Zhadkevich M. L., Tretyak N. G., Kavunenko P. M., Zelenin V. I., Mok-  
hort V. A., Zelenin E. V.* Friction stir welding and surfacing of copper  
and its alloys ..... 28

INDUSTRIAL

*Ishchenko A. Ya., Podjelnikov S. V., Poklyatsky A. G.* Friction stir weld-  
ing of aluminium alloys (Review) ..... 32  
*Knysh V. V., Kovalchuk V. S.* Increase in service life of low-alloy steel  
metal structures using a high-frequency mechanical peening after re-  
pair welding ..... 39  
*Rudenko P. M., Gavrish V. S.* System KSU KS 02 for automatic moni-  
toring and control of the resistance spot welding ..... 43  
*Zalevsky A. V., Galinich V. I., Osipov N. Ya., Netyaga V. I., Kirichenko  
O. P.* Welding-technological properties of the new flux  
of AN-47 DP grade ..... 46

BRIEF INFORMATION

Developments in the field of aluminium alloy welding ..... 52  
Theses for scientific degree ..... 60  
Patents in the field of welding ..... 62  
Review of foreign journals ..... 64

NEWS

International Scientific-Technical Conference «Machine-building and  
technosphere of the XXI century» ..... 66  
Voropay N. M. is 70 ..... 67  
Gladkiy P. V. is 70 ..... 67  
Kushnirenko B. N. is 80 ..... 68

INFORMATION ..... 69

## НКМЗ ЗАКЛЮЧИЛ КОНТРАКТ С МАГНИТОГОРСКИМ МЕТКОМБИНАТОМ

13 июня, в день 75-летия Магнитогорского комбината, подписан крупнейший в истории Новокраматорского машиностроительного завода (г. Краматорск Донецкой обл.) контракт на коренную реконструкцию непрерывного широкополосного стана 2500 горячей прокатки, изготовленного на НКМЗ и введенного в эксплуатацию в 1960 г.

Подготовка к тендеру, в котором, кроме НКМЗ, принимали участие крупнейшие производители металлургического оборудования Даниэли (Италия), Сименс-ФАИ (Австрия), СМС-Демаг (Германия), продолжалась в течение года. Она вылилась в борьбу идей и технологий с мировыми законодателями мод в области производства прокатного оборудования.

За победой концепции, которая предполагает увеличение производительности стана до 5 млн т проката в год, снижение стартовой толщины до 1 мм, увеличение массы слябов до 40 т, последовала и победа по составу оборудования.

Объем поставок в рамках контракта составляет 37,5 тыс. т оборудования, стоимость — 10 млрд руб. РФ. Оборудование для реконструкции стана 2500 должно быть изготовлено за 2,5 года.

Мы еще не побеждали мировых грандов производства в такой жесткой бескомпромиссной борьбе за масштабные комплексные поставки оборудования. Это большая честь для Новокраматорского завода завоевать доверие заказчика и получить поздравления от конкурентов, — прокомментировал это событие президент АО Г. М. Скударь на пресс-конференции 17 июля.

## НОВЫЕ ОРБИТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ СВАРКИ

Производители и пользователи сложных и чувствительных устройств в фармацевтике, химии, пищевой промышленности, энергетике, воздушных и космических перевозках, микроэлектронике, кораблях, разнообразных технологиях, измерительной и контролирующей технике большое внимание уделяют обеспечению качественных трубных соединений. Орбитальная сварка — это метод, который наиболее пригоден для этих целей. Производство высоко-



качественных трубных соединений требует применения ноу-хау и усовершенствованных технологий. Орбитальная сварочная система FPA 2020 с постоянным/переменным током от компании «Fronius» имеет и то и другое. Укомплектованную систему, которая может сохранять 200 отдельных программ, можно получить у одного поставщика.

При орбитальной сварке горелка движется вокруг зафиксированного объекта так, как луна вращается вокруг земли. Эта сварка используется для соединения труб друг с другом (часто с помощью фланцев) или для приварки труб к трубным доскам. Трубы могут располагаться как вертикально, так и горизонтально, при этом



каждое сварочное положение повторяется во время одного полного вращения.

Несмотря на различную степень влияния силы тяжести расплавленного металла на формирование швов, последнее должно быть хорошо воспроизводимым и иметь высокое качество. В добавок к интеллектуально программируемому контроллеру процесс ТИГ стал практически эксклюзивным в этой области.

Орбитальная сварочная система FPA 2020 с переменным/постоянным током имеет ряд других преимуществ: высокий уровень безопасности процесса, автоматизированную последовательность сварки, короткое время изготовления и универсальную стабильность сварки и строительных площадок. USB интерфейс со специальной подсветкой полностью выполняет документирование данных и очень легко загружает программы, не требуя возврата в программы для сохранения данных в системе. Наглядное управление через экран горелки с цветным изображением позволяет быстро и безопасно контролировать рабочие процессы.

В зависимости от сварочной задачи пользователь может выбрать наиболее подходящий процесс сварки. Для более тонких стенок труб и небольших объемов шва сварка ТИГ без применения присадочной проволоки является наиболее экономичным решением. Присадочная проволока необходима для труб с более толстыми стенками и если этого требует сварочный материал.

Необходимый механизм подачи проволоки может быть встроены в орбитальную сварочную головку или внешнее устройство. Оба варианта, конечно, поддерживаются системой FPA 2020 с постоянным/переменным током.

Стандартные программы подходят для сварки углеродистых и нержавеющей сталей, что облегчает их установку. Программы для сварки титана, инконеля, меди и двойных сплавов будут доступны в скором времени. Одной из характеристик системы FPA 2020 с постоянным/переменным током является способность создавать надежные высококачественные алюминиевые соединения с помощью источника переменного тока. Сварщик может выполнять все обычные операции управления через горелку.

Новая орбитальная система FPA 2020 от компании «Fronius», широко используемая для автоматической и ручной сварки, даже на стройплощадках выполняет качественные, воспроизводимые кольцевые соединения при очень низкой стоимости.

### ПОРТАТИВНЫЙ, ДЛЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ, ВЫНОСЛИВЫЙ, ДОСТУПНЫЙ ПО ЦЕНЕ

Компания Линкольн Электрик объявляет о производстве нового источника питания Invertec® V155-S, предназначенного для ручной дуговой сварки штучными электродами и для использования при сварке ТИГ.

Invertec® V155-S дает потребителю больше, чем можно ожидать от сварочной установки маленького размера. Установка весит меньше 15 фунтов (приблизительно 6 кг) и ее можно использовать на наиболее сложных и важных участках монтажных площа-



док. Источник работает от напряжения 115/230 В и имеет режим повторного автоматического включения. V155-S также может работать от портативного генератора. Он размещается на площади 200 футов. 230 В напряжение, удлинительный шнур (не входит в набор) позволяют выполнять сварку где угодно, без отключения от источника энергоснабжения. В комплект Ready-Pak® для ТИГ сварки входят Invertec® V155-S, электрододержатель и кабель с разъемом Twist – Mate™, рабочий кабель – Mate™, заплочный ремень, регулятор газа, горелка PTA-17V для ТИГ и набор принадлежностей в удобном, не требующем много места (легко переносимом) прочном чемоданчике. Это необходимо для начала сварки. Крепкий, ударнопрочный корпус сварочной установки IP23 рассчитан для использования в тяжелых условиях. Защищена гарантией компании «Линкольн®» на три года и дополнительной продленной двухгодичной гарантией, что в общем составляет 5 лет, эта надежная сварочная установка обладает инновационными и уникальными характеристиками:

- аудио-адаптируемая сила дуги™, которая минимизирует примерзание и разбрызгивание электрода;
- два режима управления

ручкой SOFT (мягкий) и CRISP (жесткий), вместе с процессом ТИГ с возбуждением от прикосновения электродом;

- автоматический запуск из горячего состояния™;

- вентиляция при необходимости™ уменьшает шум и количество пыли внутри установки;

- выполнение сварки при помощи электродов компании Линкольн® таких, как Fleetweld® 35, Fleetweld® 37, Fleetweld® 180, Excalibur® 7018 MR.

### ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕМОНТА И ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РЕСУРСА СВАРНЫХ СТРОЕНИЙ

Вышли в свет утвержденные Министерством транспорта и связи Украины «Рекомендации по осмотру, усилению, ремонту и увеличению эксплуатационного ресурса сплошностенчатых сварных прогоновых строений». Они содержат, в частности, описание технологии высокочастотной механической проковки ремонтных сварных соединений и механизм действия ее на сопротивление усталости последних.

Рекомендации содержат также описание типичных технологических и усталостных повреждений, встречающихся в прогоновых строениях эксплуатирующихся железнодорожных мостов, путем предупреждения возникновения трещин усталости и способах усиления поврежденных элементов этих прогоновых строений. Рекомендации составлены специалистами ИЭС им. Е. О. Патона на основе многолетних исследований работы эксплуатируемых прогоновых строений и экспериментальных лабораторных образцов, имитирующих узлы прогоновых строений с трещинами усталости.



# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКОПАЙКЕ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИПА ТИТАН–АЛЮМИНИЙ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **А. С. МИЛЕНИН**, **А. П. СЕМЕНОВ**, инженеры  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработана математическая модель термодиформационных процессов при сваркопайке стыковых соединений титана и алюминия, в рамках которой осуществлен анализ этих процессов и даны рекомендации по оптимизации производства направляющих кресел пассажирских авиалайнеров с разнородными соединениями.

*Ключевые слова: математическое моделирование, сваркопайка, титан, алюминий, термодиформирование, остаточное напряженно-деформированное состояние*

В настоящее время применение сварки для получения неразъемных соединений металлических деталей находит все большее распространение, в частности в такой достаточно консервативной с точки зрения внедрения сварочных технологий отрасли, как авиастроение [1, 2].

Наиболее распространенными конструкционными материалами в авиастроении являются алюминий, титан и их сплавы [3]. С этой точки зрения определенный интерес представляют разнородные сварные соединения титана и алюминия.

Сварка разнородных соединений нередко представляет собой комплекс сложных взаимосвязанных физико-химических, термокинетических и металлургических процессов, которые в итоге определяют качество сварного соединения, что в свою очередь усложняет процесс оптимизации соответствующей технологии сварки [4, 5]. Экспериментальные исследования в этой области являются сложными и дорогостоящими, а полученные результаты не всегда однозначными, поэтому целесообразно использовать математическое моделирование кинетики процессов, имеющих место при получении разнородных сварных соединений, на базе соответствующих численных методов [6].

Качество и работоспособность разнородных сварных соединений определяются как процессами реакционной диффузии, которые могут привести к образованию хрупких интерметаллидных прослоек, так и кинетикой полей деформаций, что определяет конечную форму изделия, и напряжений, которые могут снизить работоспособность узла, стимулировать формирование горячих трещин, а также процессов стресс-коррозии.

При сварке изделий большой длины изменение их формы может иметь существенное значение. В частности, проблема предварительной оценки сварочных деформаций стала актуальной при оптимизации разработанного в Институте прикладных лучевых технологий (BIAS, Бремен, Германия) процесса производства титан-алюминиевых сварных направляющих кресел — элементов конструкции семейства пассажирских авиалайнеров A380 производства концерна «Airbus» [1].

Рассматриваемая конструкция — сварная направляющая кресел (рис. 1, а) — представляет собой двутавровую балку переменного профиля, сваренную продольным швом, одна половина которой изготовлена из титанового сплава Ti–6Al–4V (химический состав, мас. %: 5,3...6,8 Al; 3,5...5,3 V; 0,5 N; 0,1 C; 0,0125 H; 0,3 Fe), а вторая — из алюминиевого сплава AA6056 (химический состав, мас. %: 0,7...1,3 Si; 0,5 Fe; 0,5...1,1 Cu; 0,4...0,1 Mn; 0,6...1,2 Mg; 0,25 Cr; 0,1...0,7 Zn).

Экспериментальные исследования кинетики температурного поля и термодиформационного состояния балки проводили в процессе ее сварки из тех же материалов сходной, но несколько упрощенной конструкции, элементы которой представлены на рис. 1, б. Во избежание формирования хрупких реактивных фаз в зоне разнородного контакта для получения неразъемного соединения титановой и алюминиевой части конструкции используется сваркопайка. Суть указанного сварочного процесса заключается в том, что технологические параметры подбираются таким образом, чтобы плавилась только алюминиевая часть изделия, а титановая оставалась твердой. При этом жидкий алюминий смачивает поверхность титана и образует с ним сварнопаяный контакт [1, 4–6].

Сварка титановой и алюминиевой частей изделия выполнена двумя лазерными лучами с обеих его сторон. При этом лучи одновременно пе-

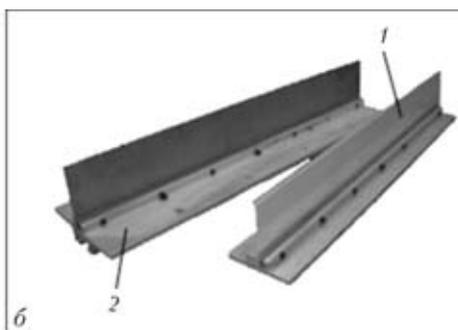
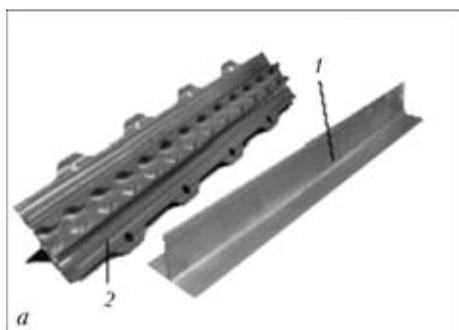


Рис. 1. Внешний вид свариваемых деталей — направляющей кресел (а) и балки упрощенной конструкции для экспериментальных исследований (б); 1, 2 — соответственно алюминиевая и титановая часть сварной балки

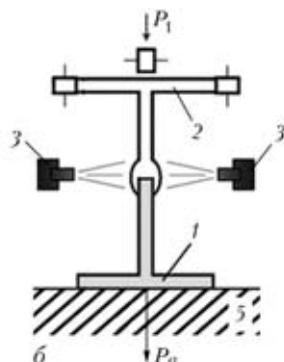
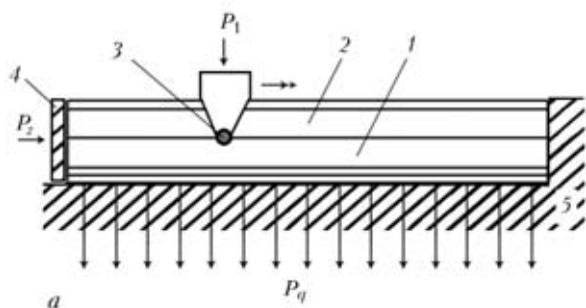


Рис. 2. Схема процесса получения лазерной сваркой соединения титан-алюминий: а — вид сбоку; б — торец; 1, 2 — соответственно титановая и алюминиевая часть изделия; 3 — лазерный источник сварочного нагрева; 4 — поршень, обеспечивающий осевое усилие; 5 — опорный стол

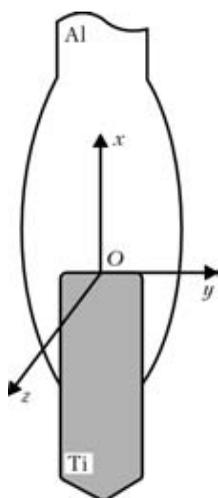


Рис. 3. Схема сварнопаяного соединения

ремещаются вдоль сварного шва, как показано на рис. 2 (двойной стрелкой обозначено направление движения лазерного источника нагрева вдоль свариваемого образца). Изделие находится в оснастке, обеспечивающей равномерное прижатие к опорному столу (прижимающее распределенное усилие  $P_q$ ), осевое усилие  $P_z$  воздействует равномерно на плоскость торца свариваемого изде-

лия посредством поршня, форма которого повторяет геометрию поперечного сечения балки, а перемещающаяся «каретка» с лазером, прижимающей силой  $P_1$  воздействует на верхнюю плоскость — алюминиевую полку.

Схема сварнопаяного соединения, представлена на рис. 3, а геометрические параметры разнородной направляющей кресел, а также сварной балки упрощенной конструкции — в табл. 1.

Технологические параметры процесса сварки стыкового соединения следующие:

Скорость перемещения источника вдоль соединения направляющей кресел (балки упрощенной конструкции), мм/с .....	4,33 (3,67)
Мощность каждого из источников, кВт .....	1,75
Диаметр сварочного пятна, мм .....	5
Прижимающая сила на «каретке» $P_1$ , Н .....	754
Прижимающее распределенное усилие $P_q$ , Н/мм .....	4,41
Осевое усилие $P_z$ , Н .....	376

Для описания термодформационных процессов сваркопайки разнородной титан-алюминиевой балки типа направляющей кресел разработана и реализована математическая модель.

Коэффициент полезного действия (КПД) лазерного источника нагрева зависит от таких па-

Таблица 1. Геометрические параметры разнородной направляющей кресел и сварной балки упрощенной конструкции

Конструкция	Длина балки, мм	Толщина части стенки балки, мм		Толщина алюминиевой полки балки, мм	Высота части стенки балки, мм	
		Al	Ti		Al	Ti
Направляющая кресел	1000	2,0	1,8	3,2	38,4	42,6
Балка упрощенной конструкции	1000	2,0	1,9	5,0	42,0	48,0



раметров, как распределение энергии в сварочном пятне, угол падения светового пучка на поверхность, состояние поверхности и др. В связи с этим целесообразно экспериментальным путем определить значения этого коэффициента отдельно для каждого конкретного случая сварки.

В рассматриваемом случае КПД лазера при воздействии на каждую из частей разнородной поверхности находили путем сравнения температурных циклов в различных точках изделия, экспериментально измеренных в процессе сварки с помощью набора термпар, с кинетикой температурного поля, полученной численным решением уравнения теплопроводности [7].

Используемые для расчета свойства титанового и алюминиевого сплавов приведены в табл. 2.

Наилучшее соответствие численных и экспериментальных данных по температурным циклам, а также по форме проплавления наблюдается со значением коэффициента эффективности источника сварочного нагрева 0,17 и 0,35 (соответственно при воздействии на поверхность алюминия и титана). Разница в значениях эффективности теплового воздействия лазера на эти металлы вызвана в первую очередь большей по сравнению с титаном отражающей способностью поверхности алюминия.

Полученные значения коэффициента эффективности позволяют с достаточно высокой точностью рассчитать кинетику температурного поля в изделии при сварочном процессе. Результаты этого расчета и их экспериментальные данные приведены на рис. 4.

Методика численного определения полей напряжений и деформаций, формирующихся в процессе сварки, основана на решении соответствующих задач нестационарной термопластичности путем последовательного прослеживания развития упру-

гопластических деформаций с исходного состояния (перед началом сварки) и вплоть до конечного состояния (после полного охлаждения и снятия технологической оснастки [8]). Поскольку длина свариваемой разнородной балки значительно превосходит характерные размеры поперечного сечения, то для описания деформирования ее оси вследствие неравномерного нагрева может быть использована двумерная модель кинетики напряженно-деформированного состояния. При этом учитывался тот факт, что изделие является симметричным относительно плоскости  $xOz$  (см. рис. 3).

Как показано на рис. 5, а, экспериментальное значение максимального остаточного прогиба алюминиевой полки балки упрощенной конструкции при рассматриваемых технологических параметрах составляет 8 мм, что с хорошей степенью точности соотносится с расчетными данными, представленными на рис. 5, б.

При сварке направляющей кресел численный анализ в рамках модели показал, что максимальное остаточное изгибное перемещение  $U_x$  алюминиевой полки составляет менее 10,5 мм (рис. 6, а).

Для того чтобы исключить из технологического цикла последующую обработку изделия с целью уменьшения кривизны оси сварной балки, степень остаточного деформирования может быть снижена путем оптимизации сварочного процесса. Это может быть сделано посредством изменения силового воздействия на изделие в оснастке при сварке или смещения положения линии сварного шва (т. е. изменением соотношения длины алюминиевой и титановой частей стенки сварной балки).

Как показал численный расчет, изменение усилий в оснастке малоэффективно, поскольку даже жесткое закрепление (что означает равенство нулю текущих изгибных перемещений оси) умень-

**Таблица 2. Физические свойства титанового и алюминиевого сплавов, используемые в математической модели [8–10]**

Физический параметр	Температура, °С							
	20	100	200	300	400	500	600	700
Ti-6Al-4V								
Теплопроводность, Дж/(°С·см·с)	0,059	0,072	0,086	0,100	0,114	0,128	0,142	0,156
Теплоемкость, Дж/(см <sup>3</sup> ·°С)	2,48	2,50	2,57	2,70	2,83	3,01	3,23	3,54
Предел текучести, МПа	1060	870	720	630	570	460	350	230
Модуль Юнга, ГПа	119	115	110	104	97	91	85	80
Коэффициент линейного расширения, 10 <sup>5</sup> ·°С <sup>-1</sup>	0,71	0,80	0,89	0,92	0,94	0,96	0,97	0,98
AA6056								
Теплопроводность, Дж/(°С·см·с)	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	5,0
Теплоемкость, Дж/(см <sup>3</sup> ·°С)	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90	2,95	3,00	3,00
Предел текучести, МПа	220	213	200	188	140	100	20	20
Модуль Юнга, ГПа	98	95	90	80	70	60	50	40
Коэффициент линейного расширения, 10 <sup>4</sup> ·°С <sup>-1</sup>	0,23	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28

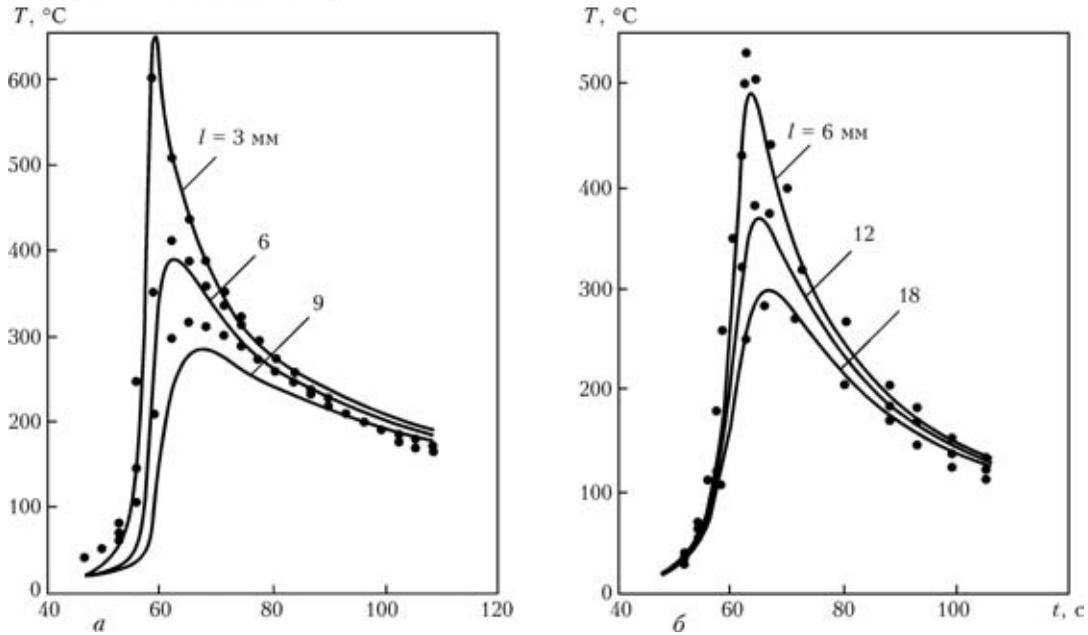


Рис. 4. Расчетные (кривые) и экспериментальные (точки) значения температурных циклов, полученные на различном расстоянии  $l$  от края титановой кромки в сторону титановой (а) и алюминиевой (б) частей изделия

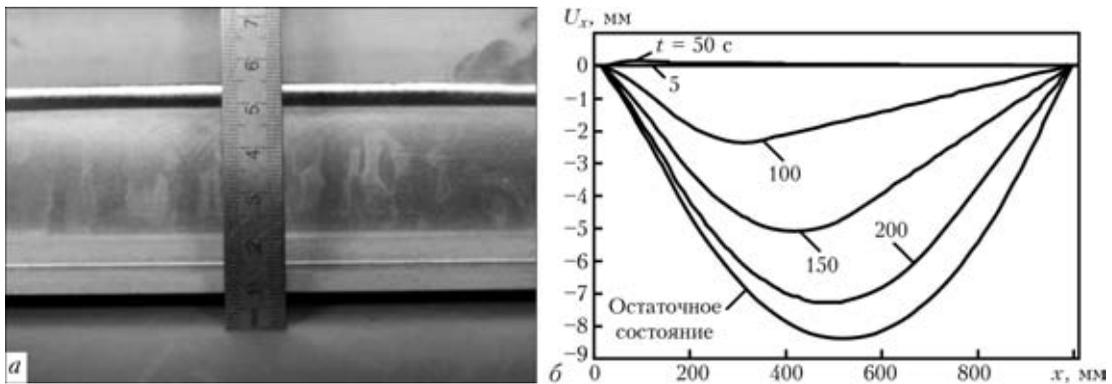


Рис. 5. Остаточный изгиб сварной балки упрощенной конструкции, измеренной экспериментально, (а) и перемещения  $U_x$  ее оси по линии шва в различные моменты времени  $t$  согласно расчету (б)

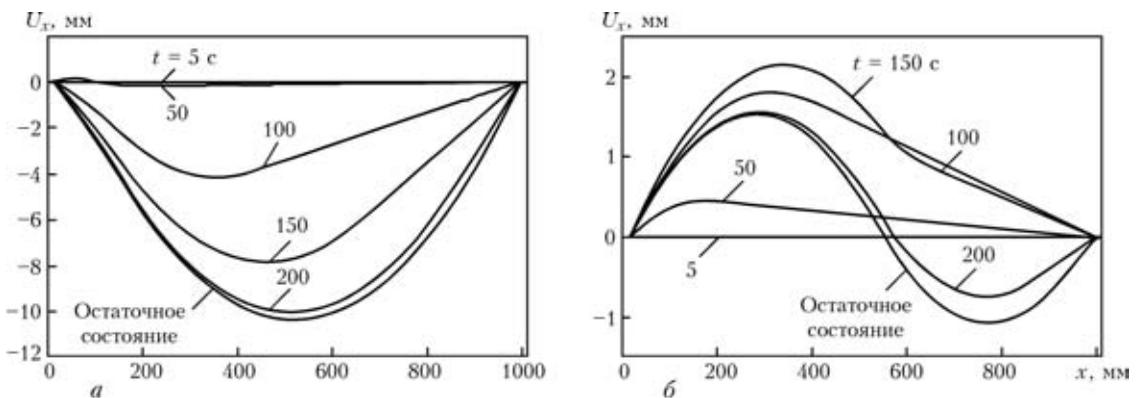


Рис. 6. Перемещения  $U_x$  оси сварнопаяющей направляющей кресел в различные моменты времени  $t$  согласно численному расчету: а — исходная конфигурация; б — оптимизированное положение сварного шва (смещение на 26 мм в сторону титановой части)

шает остаточные максимальные перемещения на 2...3 мм.

Наилучший эффект в данном случае дает смещение положения линии сварного шва в сторону титановой части изделия (что желательно с точки

зрения снижения массы конструкции). Так, смещение линии шва на 26 мм в этом направлении влечет уменьшение остаточного изгиба направляющей кресел более чем в 3 раза (рис. 6, б).



**Выводы**

1. На основе математического моделирования кинетики температурного поля при лазерной сваркопайке титан-алюминиевой конструкции (направляющей кресел пассажирских авиалайнеров) путем сравнения экспериментальных и численных результатов получены значения коэффициента эффективности теплового воздействия лазера на поверхность алюминия и титана, составляющие соответственно 0,17 и 0,35.

2. Исследования термодформационных процессов при сваркопайке встык титан-алюминиевой направляющей кресел и модельной упрощенной конструкции показали, что остаточные изгибные перемещения достигают соответственно 10,5 и 8,5 мм, что хорошо соотносится с экспериментальными данными.

3. Обнаружено, что уменьшение остаточных изгибов путем варьирования усилий, прикладываемых к свариваемому изделию в оснастке, вплоть до жесткого закрепления малоэффективно.

4. Снижение степени остаточного деформирования может быть достигнуто смещением положения сварного шва в сторону титановой части балки: при изменении положения линии шва на 26 мм максимальный остаточный прогиб уменьшится в 3 раза по сравнению с первоначальной геометрией сварного соединения.

*Авторы исследования признательны доктору Томасу Преториусу и его коллегам из BIAS (Германия) за плодотворное сотрудничество, благодаря которому проведена корректная валидация полученных результатов.*

1. Kreimer M., Vollertsen F. Processing titanium-aluminum hybrid joints for aircraft applications // Proc. of the Third intern. WLT-conf. on lasers in manufacturing, Munich, June, 2005. — Munich, 2005. — P. 238–243.
2. Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry / E. Schubert, M. Klassen, Y. Zerne et al. // J. of Materials Proc. Technology. — 2001. — **115**, № 1. — P. 2–8.
3. Williams J. C., Starke Jr. E. A. Progress in structural materials for aerospace systems // Acta Materialia. — 2003. — № 51. — P. 5775–5799.
4. *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов* / Под ред. В. Н. Замкова. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
5. *Рабкин Д. М., Рябов В. П., Гуревич С. М.* Сварка разнородных материалов. — Киев: Техніка, 1975. — 206 с.
6. *Рябов В. П.* Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами. — Киев: Наук. думка, 1983. — 264 с.
7. Numerical methods of the predictions of welding stresses and distortions / V. I. Makhnenko, E. A. Velikoivanenko, V. E. Pochinok et al. — Amsterdam: Harwood Acad. publ., 1999. — Vol. 13, pt. 1. — 146 p. — (Welding and Surfacing Rev.).
8. Jordan A. Input data for Abaqus simulation LABRA: Theory manual. — Rhode Island: Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., 2006. — 68 p.
9. *Wischhusen B.-M., Kreimeyer M.* Second progress report of laser joining development for aluminum-titanium seat tracks at BIAS. — Bremen: BIAS-Verlag, 2006. — 44 p.
10. *Boyer R., Welsch G., Collings E. W.* Materials properties Handbook. Titanium alloys. — Miami: ASM International, 1994. — 1169 p.

Mathematical model of thermal-deformation processes occurring in braze-welding of butt joints between titanium and aluminium was developed. Analysis of these processes was conducted within the frames of this model, and recommendations were worked out for optimisation of production of passenger aircraft seat guides comprising dissimilar welded joints.

Поступила в редакцию 26.02.2007

**Вышел в свет очередной (№ 18) выпуск журнала фирмы «Fronius» Weld+Vision на русском языке**

**От редактора 3-6**

Определенное звучание каждого покупаемого предмета

**Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы 7-11**

Процесс дизайна на примере свободной формы представления текста

Плазменная сварка в эру цифровых технологий

**Компания 12-13**

Открытие нового центра материально-технического обеспечения

**Кратко и по существу 14-15**

Новости от «Fronius»

**Практические примеры 16-19**

VarioSynergic соединяет границы

**Компания 20-21**

Путь к совершенному дизайну

**Информация для путешественников 22-23**

Мексика приглашает на крупное культурное событие



**По вопросам заказа просьба обращаться в редакцию журнала «Автоматическая сварка»**

**Тел./факс: (38044) 528-34-84, 529-26-23, 528-04-86; E-mail: journal@paton.kiev.ua**



## СВАРКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

(направления исследований, проводимых в ИЭС им. Е. О. Патона)

Чл.-кор. НАН Украины А. Я. ИЩЕНКО (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Кратко освещены основные направления исследований, проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона за столетия в области сварки алюминиевых сплавов. Приведены примеры эффективного применения технологий дуговой сварки алюминиевых сплавов при сооружении различных конструкций.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, автоматическая сварка по флюсу, сварка неплавящимся электродом, переменный ток, высокоамперная дуга, асимметричный разномерный ток, сварка плавящимся электродом, импульсно-дуговая сварка, узкощелевая сварка, алюминиевые сплавы, микролегирование скандием

Как и в других развитых странах, в Украине предполагается увеличение объемов выпуска алюминия и его высокопрочных сплавов в виде деформированных полуфабрикатов, необходимых для производства железнодорожных пассажирских вагонов, легковых и грузовых автомобилей, автобусов, самолетов, изделий ракетно-космической отрасли, химической, медицинской и пищевой промышленности, а также в строительстве.

Значительные трудности, возникающие при сварке плавлением алюминиевых сплавов, связаны с большой химической активностью компонентов, которые входят в состав сплавов. Взаимодействие с кислородом и склонность к поглощению водорода приводят к возникновению в швах грубых оксидных пленок и пористости. Наиболее прочные сплавы склонны к образованию горячих трещин и разупрочнению при сварке плавлением. Эти особенности резко проявляются при использовании новых высокоресурсных алюминево-литиевых сплавов, которые, благодаря низкой плотности и повышенному модулю жесткости, позволяют на 10...15 % уменьшить массу конструкций и соответственно повысить грузопместимость пассажирских и транспортных самолетов, других транспортных средств.

Научные исследования и инженерные разработки в области дуговой сварки алюминия и его сплавов были начаты в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины в 1951 г. в лаборатории сварки цветных металлов и сплавов, перед которой была поставлена задача в сжатые сроки организовать поточное производство цистерн из сплава АМц толщиной 18...20 мм для перевозки и хранения жидкого кислорода и других химических продуктов, используемых для запуска ракет. Попытки использовать на заводе сварку в

инертных газах не дали положительных результатов, так как соединение толстолистового металла приходилось выполнять с разделкой кромок за несколько проходов.

При этом необходимы были тщательная подготовка поверхности свариваемых кромок и проволоки, использование аргона, иногда и гелия. Кроме того, оборудование для сварки в тот период было несовершенным.

Задача была решена путем разработки и внедрения в массовое производство автоматической сварки по флюсу марки АН-А1. Эта технология являлась ведущей при массовом производстве емкостей от 1 до 100 м<sup>3</sup> на заводах «Большевик» (г. Киев), «Красный Октябрь» (г. Фастов), Сумском машиностроительном и ряде других предприятий, котлов железнодорожных цистерн на Мариупольском ПО «Азовмаш». Котлы и емкости предназначались для хранения и транспортировки пищевых и химических продуктов — воды, молока, азотной кислоты, ракетного топлива и др.

В 1960–1970-х годах началось активное применение алюминиевых сплавов повышенной прочности в производстве ракетно-космической техники, судо-, танко- и вагоностроении, химической промышленности, строительстве и других отраслях. Сварка по флюсу таких объектов не обеспечивала требуемого качества швов и необходимые свойства соединений. При сварке металла толщиной свыше 15 мм увеличивалась опасность образования шлаковых включений и пор в швах, а также возрастали требования к соблюдению санитарно-гигиенических условий труда. Указанные обстоятельства обусловили интенсивную разработку более эффективных способов и технологий сварки в инертных газах и электронным лучом. Работы в этом направлении велись параллельно, что позволило гибко выбирать различные варианты технологии в зависимости от требований к изделиям, условиям производства и эксплуатации.

Среди способов сварки в инертных газах алюминиевых сплавов в начале 1960-х годов ведущее положение занимала аргонодуговая сварка неп-



лавящимся электродом переменным током синусоидальной формы, которая обеспечивала более высокие качество металла шва и механические свойства соединений по сравнению со сваркой плавящимся электродом в аргоне. Что касается проплавляющей способности дуги, то она ограничивалась недостаточной стойкостью электродов из наиболее стойкого в то время торированного вольфрама. Поэтому были созданы вольфрамовые электроды с присадкой до 1,5...2 % оксида лантана (ЭВЛ) и с 3,0...3,5 % оксида иттрия (ЭВИ). В отличие от торированных они являются радиационно безопасными.

Иттрированные электроды позволили увеличить плотность мощности столба дуги в 1,5...2,0 раза без опасного перегрева электродов, добиться существенного повышения эффективности плавления свариваемого металла. С помощью иттрированных электродов диаметром 10 мм появилась возможность сваривать за один проход однофазной высокоамперной дугой (до 900...1000 А) алюминиевые сплавы толщиной до 20 мм, а трехфазной дугой — 30...40 мм. Разработанное при этом соответствующее сварочное оборудование способствовало расширению области использования сварки неплавящимся электродом. Уже к середине 1960-х годов технология автоматической сварки высокоамперной дугой корпусных изделий ракетносителей из сплава АМгб осваивается на предприятиях, конструкторских бюро С. П. Королева, В. П. Челомея, М. К. Янгеля.

Промышленный опыт изготовления конструкций ответственного назначения из сплава АМгб показал, что, несмотря на строгое соблюдение требований к подготовке металла и технологии сварки неплавящимся электродом, в швах встречались недопустимые включения оксидной пленки. Идея интенсификации перемешивания металла сварочной ванны с целью измельчения оксидных включений и одновременно его дегазации была реализована при сварке неплавящимся электродом пульсирующей дугой. Дальнейшие исследования позволили установить эффективность способа и создать специализированное оборудование. При этом удалось уменьшить в 3 раза относительную протяженность включений оксидной пленки в сварных швах сплава АМгб и вероятность образования ее протяженных включений при сварке литийсодержащих сплавов 1420 и 1460. Резкие изменения амплитуды в период импульса и паузы (модулированный ток) обеспечили снижение в 7...10 раз суммарного объема пустот в сварных соединениях сплавов.

В то же время была установлена более высокая эффективность применения асимметричного разнополярного тока прямоугольной формы для дуговой и плазменной сварки. Благодаря сокращению времени протекания тока обратной поляр-

ности до 10...30 % общего цикла снижается нагрузка на вольфрамовый электрод, а в периоды прямой полярности достигается более глубокое проплавление основного металла. В результате была повышена скорость сварки, снижен показатель погонной энергии, уменьшена масса и габариты плазматрона.

Исследования физических явлений, происходящих в дуге, позволили достичь более высокой концентрации тепловой энергии при гелиево-дуговой сварке постоянным током по сравнению со сваркой вольфрамовым электродом переменным током в аргоне. Это способствовало повышению проплавляющей способности дуги, снижению в 1,5...2,0 раза погонной энергии и соответственно уменьшению зоны термического влияния.

В дальнейшем было показано, что дуговой способ сварки плавящимся электродом по сравнению со сваркой неплавящимся электродом оказался менее чувствительным к размерам зазора и превышению толщин соединяемого металла, обеспечил более высокую скорость сварки и меньший уровень остаточных деформаций сварных узлов. Однако нестабильное качество швов, получаемых при сварке стационарной дугой в аргоне, ограничивало применение ее в производстве ответственных конструкций. Разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона новые способы сварки и оборудование для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом явились значительным достижением в области сварки плавлением. Технологические исследования процесса сварки с использованием генераторов импульсного тока позволили повысить стабильность горения дуги, значительно уменьшить разбрызгивание металла и испарение легколетучих элементов, снизить количество и размеры оксидных включений и пор в швах.

Благодаря этому со середины 1960-х годов импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом находит все более широкое применение в промышленности, в частности, при изготовлении компонентов ракетно-космических комплексов на предприятиях НПО «Энергия», корпусов легких десантируемых бронемашин на Волгоградском заводе и бронемашин пехоты на Курганском машиностроительном заводе, пассажирских железнодорожных вагонов и вагонов метро, самосвалных платформ автомобилей, автомобильных рефрижераторов, надстроек судов, строительных конструкций и других изделий.

Высокие требования, предъявляемые к сварным соединениям емкостей из сплава АМцС и технического алюминия для хранения и перевозки агрессивных продуктов, потребовали разработки в ИЭС им. Е. О. Патона высокопроизводительной технологии сварки плавящимся электродом большого диаметра (3...4 мм) стационарной дугой в



смеси инертных газов — гелия и аргона. Использование этих смесей позволило не только уменьшить в 2...8 раз объем микропустот в наплавленном металле, повысить механические свойства и коррозионную стойкость сварных соединений, но и увеличить на 40...60 % производительность процесса сварки. Такая технология была успешно реализована при изготовлении емкостей на Балашихинском ПО «Криогенмаш», в поточном производстве алюминиевых котлов железно-дорожных цистерн на ПО «Азовмаш».

Использование импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом диаметром 1...1,6 мм в смесях газов гелия и аргона позволило получить более высокий уровень механических свойств тонколистовых соединений алюминий-литиевых сплавов по сравнению со сваркой неплавящимся электродом пульсирующим током. Процесс нашел широкое применение в производстве шпангоутов ракет и корпусов боевых машин пехоты на Курганском машиностроительном заводе. Для сварки плавящимся электродом в ИЭС им. Е. О. Патона разработано семь типов сварочных установок, тракторов, автоматов.

Для соединения толстостенных конструкций (до 150 мм) разработана технология узкощелевой сварки импульсной и стационарной дугой плавящимся электродом в гелии и его смесях с аргоном. Способ позволил получить доброкачественные соединения в нижнем положении и на вертикальной плоскости, а также сократить в несколько раз количество сварочных проходов, уменьшить зону термического влияния и уровень остаточных деформаций, сэкономить сварочные материалы и электроэнергию.

Отмеченные преимущества новых технологий также привели к широкому внедрению их в производство изделий аэрокосмической техники из алюминиевых сплавов АМг6, 1201, 1420, в том числе комплекса «Энергия-Буран», ракет-носителей и космической орбитальной техники.

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) отличается уникальным сочетанием особенностей: высокой плотностью энергии в пучке малого диаметра, надежной защитой зоны сварки и рафинирующим воздействием вакуумной среды, возможностью достижения очень высоких скоростей кристаллизации жидкого металла. С применением ЭЛС изготавливаются самые ответственные и высоконагруженные детали и узлы, работающие в условиях космического вакуума, знакопеременных нагрузок и весьма низких температур. В промышленных условиях освоена ЭЛС разнообразных деталей и узлов: от миниатюрных до крупногабаритных, толщиной от десятых долей миллиметра до 200 мм. В отдельных случаях реализована сварка заготовок толщиной до 400...600 мм. Для осуществления ЭЛС созданы установки, объем ваку-

умных камер которых составляет от нескольких кубических дециметров до 1500 м<sup>3</sup>. При сварке крупногабаритных конструкций суммарная протяженность сварных швов достигает 100...150 м.

Расширению внедрения этого способа сварки способствует создание установок, позволяющих работать в условиях локального или низкого вакуума. Разработано автоматическое управление процессом сварки, позволяющее получать высококачественные сварные соединения. Для достижения этого используют также систему программирования тепловложения для различных участков объема сварочной ванны. Использование сканирования пучка и программированного тепловложения в сочетании с подачей присадочной проволоки позволяют снизить требования к точности сборки стыка без потери качества формирования швов при зазорах до 3,0 мм (толщина заготовок 50...100 мм).

Хорошие результаты обеспечивает ЭЛС при изготовлении стрингерных панелей из тонколистового материала. Приварка ребер к оболочке толщиной 2...3 мм выполняется двумя угловыми швами, одним угловым швом с одной стороны или прорезным швом. Во всех случаях швы можно сформировать без применения присадки.

Лазерная сварка позволяет получить подобные тонкостенные конструкции без использования вакуумируемых камер. При этом открывается возможность сваривать любые крупногабаритные конструкции. Способ сварки характеризуется высокой удельной плотностью энергии и позволяет вести сварку с большой скоростью, но с малым тепловложением. Это способствует снижению уровня остаточных деформаций и напряжений в изделиях, а также повышению прочности сварных соединений на 10...15 % по сравнению с аргонодуговой сваркой. Уверенность в более широком применении этого способа сварки основана как на результатах интенсивного освоения техники и технологии сварки этим способом, так и на успешном комплексном использовании процессов лазерной и дуговой сварки. Такие гибридные технологии позволяют объединить преимущества двух разных способов сварки в одном, что делает его более эффективным и экономичным.

Альтернативным по отношению к перечисленным, наиболее широкоиспользуемым способам сварки плавлением, следует считать соединение в твердом состоянии без расплавления основного материала, например, способом трения с перемешиванием. Использование такой технологии соединения позволяет исключить перегрев сплавов и вместе с тем обеспечивает пластическую деформацию металла шва. Это благоприятно отражается на уровне механических свойств соединений и исключает некоторые рассмотренные



проблемы сварки плавлением высокопрочных алюминиевых сплавов.

Разработка ВИАМом высокопрочных алюминиевых сплавов различных систем легирования (Al–Mg, Al–Cu, Al–Zn–Mg–Cu) и особенно нового класса сверхлегких алюминий-литиевых сплавов, которыми занимался академик И. Н. Фридляндер с сотрудниками, послужила фундаментом многолетнего творческого контакта между ИЭС им. Е. О. Патона и ВИАМ. Следствием такого сотрудничества явилось успешное решение проблем свариваемости и внедрение новых материалов в производство авиационной, ракетной и космической техники. Эффективность сварных конструкций, например, топливного бака и кабины пилота из алюминий-литиевого сплава типа 1420, подтверждена созданием и многолетней эксплуатацией сверхзвуковых истребителей серии МиГ-29.

В 1990-е годы совместно с ВИАМом и ВИЛСом, его руководителями академиком А. Ф. Беловым и чл.-кором РАН В. И. Добаткиным были выполнены важнейшие исследования, направленные на улучшение характеристик перспективных легких сплавов. Созданы также специальные сварочные материалы (присадки) на основе Al–Mg и Al–Cu сплавов, которые содержат до 0,5 % скандия. Благодаря этому целый ряд высокопрочных трудносвариваемых сплавов стал удовлетворительно соединяться, а прочность швов возросла на 10...15 %. Более значительный эффект получен при легировании скандием не только присадок, но и основного металла полуфабрикатов на уровне 0,1...0,2 %.

В настоящее время под руководством Б. Е. Патона учеными и специалистами института выполняются фундаментальные исследования в области сварки легких металлов и сплавов по следующим направлениям:

- изучение явлений, происходящих в зоне сварки при взаимодействии компонентов легких сплавов и композиционных материалов с плазмой дуги, электронным и лазерным пучками, обоснование условий доброкачественного формирования сварных соединений;

- определение характеристик свариваемости новых алюминиевых сплавов различных систем легирования и поиск способов преодоления склонности их к образованию горячих трещин и

пористости при сварке плавлением и в твердой фазе;

- изыскание методов соединения разнородных материалов;

- исследование закономерностей первичной кристаллизации и механизмы формирования структуры швов в неравновесных условиях при больших скоростях охлаждения, прерывистых и импульсных подачах энергии, а также под влиянием микродобавок различных модификаторов структуры;

- исследование микроструктурных превращений в зоне сварки алюминиевых сплавов и их влияние на физико-механические свойства сварных соединений алюминиевых сплавов различных систем легирования;

- определение влияния эксплуатационных факторов, а именно температуры в широком диапазоне от 4 до 60 К, агрессивных сред, характера напряженного состояния, наличия концентраторов напряжения, химической и физической неоднородности сварных соединений, на работоспособность и долговечность конструкций из легких сплавов;

- разработка новых технологий неразъемного соединения перспективных конструкционных материалов на основе алюминия, включая дисперсные алюмокомпозиты, интерметаллиды и разнородные материалы, которые трудно соединяются при обычных способах сварки плавлением;

- обоснование критериев надежной эксплуатации сварных конструкций ответственного назначения в различных условиях с учетом их структурной и химической неоднородности.

Значительным достижением начавшегося третьего тысячелетия являются разработки наноструктурных материалов с исключительно высокими свойствами и нанотехнологий неразъемного соединения в твердой фазе трудносвариваемых материалов таких, как интерметаллиды. Они построены на базе алюминия, титана, никеля и нанодисперсных композиционных систем. Для этого создан новый класс эффективных наноструктурных материалов в форме многослойных плен и тонких фольг, получаемых с использованием электроннолучевой парофазной технологии и других методов тонкого диспергирования.

The main directions of investigations conducted at the E. O. Paton Electric Welding Institute over half a century in the field of arc welding of aluminium alloys are outlined. Examples of an effective application of technologies of arc welding of aluminium alloys in fabrication of various structures are given.

Поступила в редакцию 18.08.2007



## СВОЙСТВА И СТРУКТУРА СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ГИБРИДНОЙ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКОЙ

Е. Г. ТЕРНОВОЙ, В. Ф. ШУЛЫМ, инженеры,  
В. Ю. ХАСКИН, В. Д. ШЕЛЯГИН, А. В. ЛОЗОВСКАЯ, кандидаты техн. наук,  
А. В. СИОРА, А. В. БЕРНАЦКИЙ, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проведены исследования процесса получения соединений алюминиевых сплавов способом гибридной лазерно-плазменной сварки. Изучены особенности свойств и структуры этих соединений. Эксперименты по сварке выполняли как с подачей присадочной проволоки, так и без нее, что позволило устранить пористость сварных соединений и значительно улучшить их свойства.

*Ключевые слова:* гибридная лазерно-плазменная сварка, алюминиевые сплавы, присадочная проволока, свойства соединений, макро- и микроструктура, пористость, микротвердость, химическая неоднородность, распределение водорода

Сварные конструкции из алюминия и его сплавов получили широкое применение в различных отраслях промышленности. Из этих сплавов изготавливают конструкции, работающие в условиях сложных переменных нагрузок, повышенных и низких температур, а также в агрессивных средах [1]. Благодаря малой массе, достаточно высокой удельной прочности и коррозионной стойкости алюминиевые сплавы широко применяются в судостроении, химическом и авиакосмическом машиностроении, а также автомобилестроении [2–6].

В настоящее время конструкции из алюминиевых сплавов изготавливают с помощью сварки плавлением [7, 8]. К особенностям сварки алюминиевых сплавов следует отнести высокую степень сродства к кислороду, наличие в швах оксидной пленки  $Al_2O_3$  и склонность к порообразованию, что оказывает существенное влияние на свойства и структуру сварных соединений [9–11]. Для предотвращения порообразования и получения требуемого качества соединений используют следующие способы: предварительную подготовку свариваемых кромок и присадочных материалов, а также легирование металла сварных швов. Предварительная подготовка включает механическое или химическое удаление оксидной пленки на поверхности соединения и присадочного материала [12]. Второй способ предусматривает использование присадочных материалов или сварочных флюсов с добавками легирующих элементов [13].

Одним из наиболее перспективных способов соединения алюминиевых сплавов является гиб-

ридная лазерно-плазменная сварка [14–16]. Однако особенности влияния легирования сварных швов на их физико-механические свойства при этом способе сварки исследованы недостаточно. В настоящей работе этому вопросу и посвящены исследования применительно к сварным соединениям алюминиевых сплавов. Гибридный лазерно-плазменный способ сварки (рис. 1) позволяет сочетать преимущества обоих процессов сварки (при этом их недостатки взаимно устраняются) и получать гибридный эффект [17] от совместного использования лазерного излучения и электрической дуги. Это так называемый эффект нарушения аддитивности теплового влияния лазерного излучения и плазмы дуги на обрабатываемый материал, вызванный переходом от теплопроводного режима сварки к режиму кинжального проплавления [18–20].

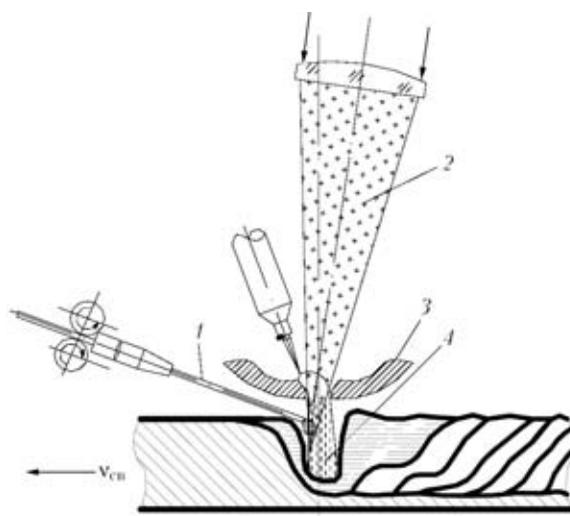


Рис.1. Схема гибридной лазерно-плазменной сварки: 1 — присадочная проволока; 2 — лазерный пучок; 3 — сопло плазмотрона; 4 — плазменная дуга



В исследованиях использовали диодный лазер модели DF 020 HQ (фирма «Рофин-Синар», Германия) мощностью до 2 кВт с длиной волны 0,808...0,940 мкм, а также плазмотрон оригинальной конструкции мощностью до 2 кВт с диаметром плазмообразующего сопла 2,5...3,0 мм и источником питания для сварки на токе прямой полярности и в режиме разнополярных прямоугольных импульсов тока [20]. В экспериментах использовали образцы из алюминиевых сплавов АМг3 и АМг6 толщиной 0,8; 1,5; 2,0 и 3,0 мм, которые проплавлили и сваривали встык лазерным, плазменным и гибридным способами сварки. При этом определяли оптимальные режимы сварки, свойст-

ва и структурные особенности соединений, полученных как без подачи присадочной проволоки, так и с ее подачей.

Оценку качества проплавлений и стыковых соединений выполняли путем внешнего осмотра, а также по макрошлифам. Наличие пор, оксидных включений, трещин, раковин и непроваров в швах проверяли рентгеновской дефектоскопией с помощью аппарата РАП-150/300. Химический состав основного металла и металла швов выявляли спектральным анализом с использованием фотоэлектрического спектрометра ДФС-36, а временное сопротивление разрыву сваренных соединений определяли путем механических испытаний

**Таблица 1. Влияние способов и режимов сварки (наплавки) на макроструктуру соединений**

№ опыта	Марка сплава	Толщина образца, мм	Способ сварки (наплавки)	Мощность лазера, кВт	Скорость сварки, м/ч	Сварочный ток прямой/обратной полярности, А	Продолжительность импульса, мс	Макрошлиф
1	АМг6	1,5	(Лазерная)	2,0	108,0	—	—	
2		1,5	(Плазменная)	—	108,0	100/50	50/50	
3		1,5	(Гибридная)	1,5	108,0	77/50	50/50	
4		1,5	» »	1,2	108,0	63/30	50/50	
5*		1,5	» »	1,5	108,0	85/50	50/50	
6	АМг3	1,5	Лазерная	2,0	108,0	—	—	
7		1,5	Плазменная	—	108,0	100/50	35/90	
8		1,5	Гибридная	1,5	108,0	70/50	50/50	
9*		1,5	» »	1,5	78,0	75/50	50/50	
10		3,0	(Лазерная)	2,0	14,4	—	—	
11		3,0	(Плазменная)	—	14,4	100/50	35/35	
12		3,0	(Гибридная)	1,5	34,4	100/50	35/35	

\* — здесь и в табл. 2, 3 сварка образца с присадочной проволокой.

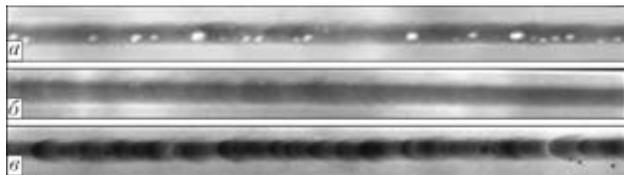


Рис. 2. Рентгенограммы соединений алюминиевого сплава АМг3 (а, в) и АМг6 (б) толщиной 2 мм, полученных гибридной лазерно-плазменной сваркой без (а, б) и с присадочной проволокой (в)

на разрывной машине ЦДМ-4 при температуре 20 °С. Металлографические исследования геометрии и структуры металла швов выполняли на поперечных макро- и микрошлифах с помощью оптических микроскопов МБС-9 и «Neophot-32» (с увеличением от 15 до 150). Структурные составляющие выявляли электролитическим травлением в растворе ледяной уксусной и хлорной кислот.

Микротвердость соединений  $HV_{0,05}$  измеряли на поперечных микрошлифах микротвердомером М-400 фирмы «LECO» с шагом 0,1 мм. Химическую неоднородность соединений исследовали на микроанализаторе «SX-50» фирмы «Сатеса», а содержание водорода в основном металле и металле сварных соединений определяли методом экстракции с помощью локального масс-спектрального анализа на установке «ЭХО-4М» с лазерным зондом диаметром 300 мкм. Продолжительность импульса облучения составляла  $1 \cdot 10^{-5}$  с, его мощность — 7,5 Дж.

Исследования выполняли в два этапа. На первом проводили эксперименты без применения присадочной проволоки. При этом проплавление и сварку стыковых соединений выполняли на плоских образцах размером 200×100 мм в среде аргона с помощью лазерного излучения или плазмы прямого действия, а также гибридным способом. Расход плазмообразующего газа составлял 4 л/мин, а расход на защиту сварочной ванны и оптики лазерной головки — соответственно 10...12 и 0,5 л/мин. Мощность сфокусированного излучения варьировали в пределах 0,5...2,0 кВт. Диаметр фокального пятна при этом равен 1,2 мм, а заглупление фокуса относительно поверхности образца — 0,5...1,0 мм. Были подобраны режимы проплавления и сварки различными способами для сплавов АМг3 и АМг6 толщиной 1,5 и 3,0 мм в диапазоне скорости сварки 10...110 м/ч.

На втором этапе исследований выполнены наплавки и сварены стыковые соединения из сплавов АМг3 и АМг6 толщиной 0,8; 1,5 и 2,0 мм с подачей присадочной проволоки в сварочную ванну, образованную с помощью отдельных или двух совмещенных в одной точке источников нагрева. В экспериментах использовали проволоку СвАМг6 диаметром 1,2 мм, поверхность которой отполирована электрохимическим способом.

В результате проведенных исследований установлено, что излучение диодного лазера мощностью 2 кВт позволяет получить на пластинах сплавов АМг3 (толщиной 1,5 и 3,0 мм) и АМг6 (толщиной 1,5 мм) проплавление глубиной около 0,6 мм при скорости сварки соответственно 108 и 14,4 м/ч, а при сварке стыковых соединений этих же сплавов толщиной 1,5 мм со скоростью 108 м/ч глубина проплавления составляет 0,7 мм (табл. 1). Небольшая глубина проплавления при лазерной сварке алюминия и его сплавов объясняется сравнительно большим диаметром пятна фокусирования излучения, что обеспечивает плотность мощности всего около  $1 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, а, как известно, для достижения режима глубокого проплавления необходимая плотность мощности должна превышать  $1 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> [20]. Плазма той же мощности (напряжение дуги 20 и 18 В) и на тех же скоростях сварки позволяет получить глубину проплавления соответственно 1,25 и 1,00 мм. Гибридное сочетание этих источников нагрева с суммарной мощностью 3,0 и 3,5 кВт для сплавов указанной толщины обеспечило полное сквозное проплавление стыкового соединения толщиной 1,5 мм на скорости 108 м/ч и сплошной пластины толщиной 3 мм на скорости 34,4 м/ч.

Радиационный контроль показал, что в соединениях сплава АМг3, полученных гибридным способом сварки без подачи присадочной проволоки, выявлена значительная пористость (рис. 2, а). В аналогичных соединениях сплава АМг6, полученных тремя рассмотренными способами сварки, поры также были обнаружены, но в значительно меньших количествах (рис. 2, б). При гибридном способе сварки этих же сплавов и соединений с введением присадочной проволоки СвАМг6 получены соединения с высокой плотностью швов (рис. 2, в).

Анализ макрошлифов соединений (табл. 1) показал, что путем выбора режима сварки и скорости подачи присадочной проволоки можно достичь оптимальной геометрии и удовлетворительного формирования верхнего и корневого валиков усиления.

Химический состав основного металла и металла швов соединений сплавов АМг3 и АМг6 толщиной 1,5...3,0 мм, полученных гибридным способом, приведен в табл. 2. Состав металла шва соединений, полученных без подачи присадочной проволоки, практически не отличается от исходного состава основного металла. При введении присадочной проволоки СвАМг6 в сварочную ванну в металле шва соединений сплава АМг3 имеет место повышение содержания легирующего элемента магния с 3,3 до 4,8 мас. %.

Сравнивая значения временного сопротивления разрыву соединений сплавов АМг3 и АМг6 толщиной 1,5 и 2,0 мм (табл. 3), следует отметить



**Т а б л и ц а 2.** Химический состав (мас. %) основного металла и металла швов, выполненных гибридным способом сварки на сплавах АМг3 и АМг6

Марка сплава	Участок	Si	Mg	Mn	Cu	Zn	Ni	Ti	Fe
АМг3	Основной металл	0,38	3,5	0,5	0,10	0,18	0,03	0,10	0,40
	Шов	0,40	3,2	0,3	0,10	0,12	0,03	0,10	0,40
АМг3*	» »	0,40	4,8	0,3	0,10	0,12	0,03	0,10	0,40
АМг6	Основной металл	0,18	6,4	0,6	0,06	0,14	0,03	0,06	0,25
	Шов	0,17	6,0	0,5	0,05	0,08	0,03	0,06	0,27
АМг6*	» »	0,15	6,0	0,5	0,05	0,08	0,03	0,03	0,23

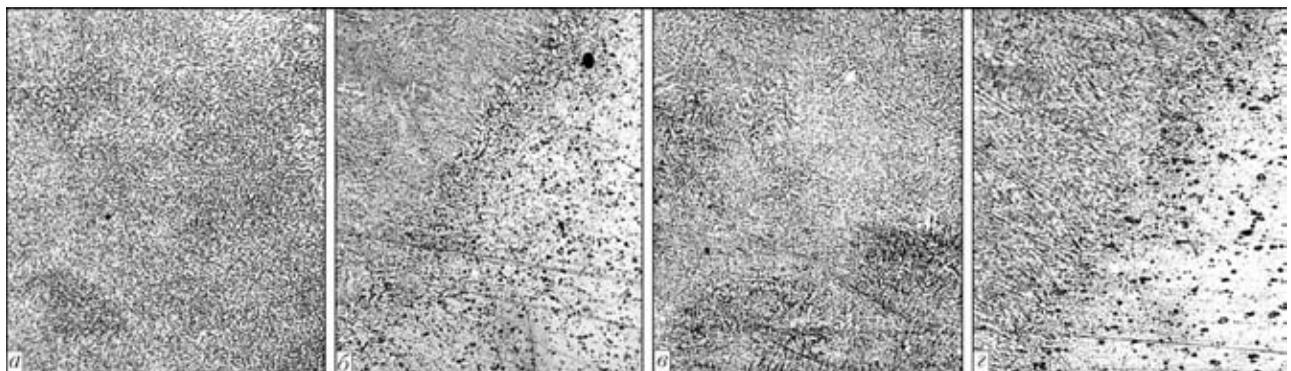
низкую прочность соединений сплава АМг3, полученных гибридным способом сварки без подачи присадочной проволоки. Разрушение таких образцов происходило по оси шва, а коэффициент прочности составил около 0,5...0,6 прочности основного металла. В местах разрушения металла выявлено наличие пористости и оксидных включений. Временное сопротивление разрыву соединений сплава АМг6, выполненных гибридной сваркой с подачей присадочной проволоки, составило (0,84...0,87) $\sigma_B$  основного металла, а сплава АМг3 — (0,85...0,9) $\sigma_B$  основного металла. Разрушение образцов происходило по основному металлу в зоне термического влияния. Повышенные значения сопротивлению разрыва металла шва соединений сплава АМг3 объясняется увеличением массовой доли магния в металле швов по сравнению с основным металлом за счет введения присадочной проволоки СвАМг6 и увеличения сечения шва. Для подтверждения этой гипотезы изучены микроструктуры соединений алюминиевых сплавов, выполнены замеры микротвердости, проведены исследования химической микронеоднородности и определено содержание водорода в металле полученных соединений.

Исследования микроструктуры соединений сплавов АМг3 и АМг6 (рис. 3), полученных без присадочной проволоки и с ее подачей, показали, что в основном металле и металле шва, кроме  $\alpha$ -твердого раствора магния и марганца, в алю-

**Т а б л и ц а 3.** Результаты испытаний на временное сопротивление  $\sigma_B$  разрыву основного металла и соединений сплавов АМг3 и АМг6, полученных гибридным способом сварки

Сплав	Основной металл	Сварное соединение
АМг3	$\frac{222...228}{215}$	$\frac{128...147}{132}$
АМг3*		$\frac{192...207}{196}$
АМг6	$\frac{353...357}{350}$	$\frac{292...309}{298}$
АМг6*		$\frac{290...308}{295}$

минии присутствуют также двойные и более сложные  $\beta$ -фазы  $Mg_2Al_3$  или  $Mg_5Al_3$ , которые размещаются в основном металле и по границам зерен в виде тонких нитевидных выделений, а в металле шва — в виде мелких эвтектических выделений, расположенных между ветвями дендритов [21]. Выделения фаз в металле швов мелкодисперсные, границы сплавления — без признаков перегрева. Наблюдается также наличие непрерывных цепочек выделений по границам зерен в зоне термического влияния непосредственно на границе сплавления. Сама зона сплавления в этих соединениях очень узкая, с мелкозернистой структурой и представляет собой непрерывный переход зерен основного металла в кристаллиты металла



**Рис. 3.** Микроструктуры ( $\times 150$ ) соединений сплава АМг6, полученных гибридным способом сварки без подачи присадочной проволоки (а, б) и с ее подачей (в, з): а, в — металл шва; б, з — зона сплавления

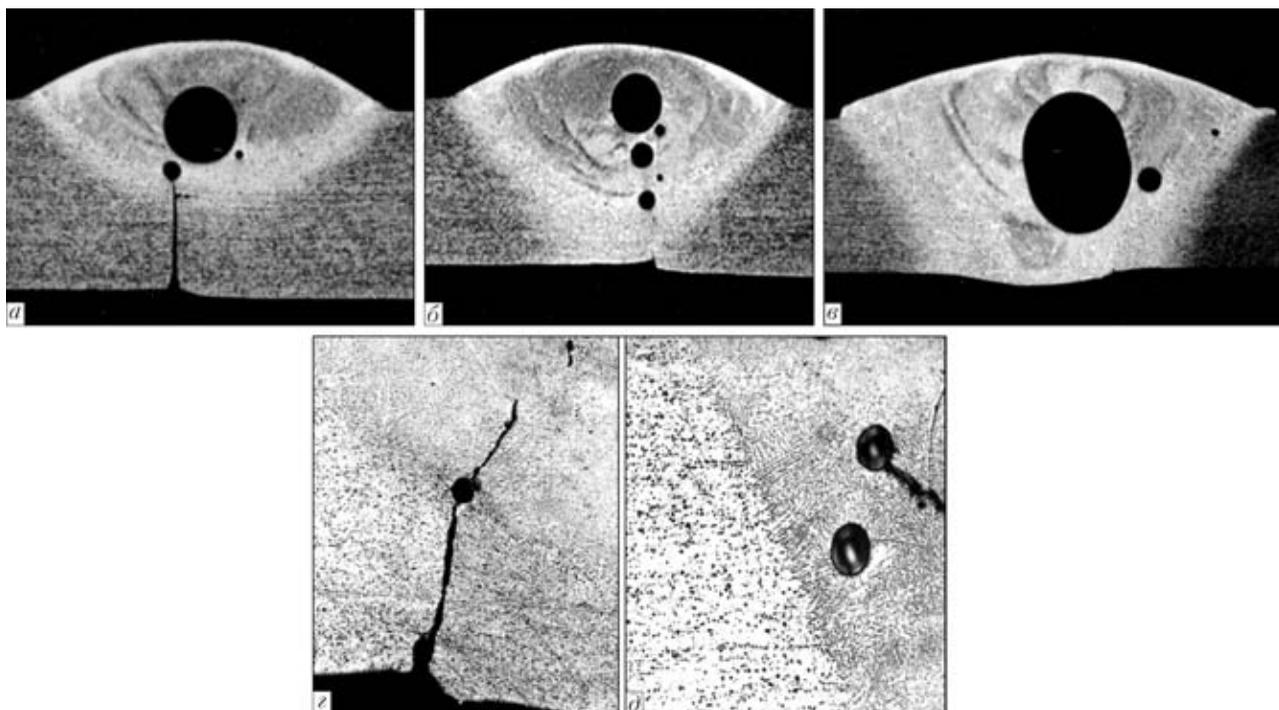


Рис. 4. Макро- ( $\times 8$ ) и микроstructures ( $\times 150$ ) с дефектами в соединениях сплавов АМг3 (а–с) и АМг6 (д), полученных лазерной (а), плазменной (б) и гибридной лазерно-плазменной (в–д) способами сварки без подачи присадочной проволоки

шва. Дендриты направлены от границы сплавления в сторону металла шва. В центральной части шва наблюдается также наличие смеси равноосных и направленных дендритов.

Необходимо отметить, что текстура деформаций основного металла сохраняется идентичной до самой границы сплавления (рис. 3, б, с), а в зоне термического влияния отсутствует рекристаллизация зерен, чего нельзя сказать о корневой части шва, где имеется зона рекристаллизованных зерен. В соединениях сплавов АМг3 и АМг6 наблюдается макро- и микродефекты в виде пор (рис. 4, а–в), микропор, оксидных плен и трещин (рис. 4, г, д). Наличие макро- и микропор в металле шва и зоне сплавления, особенно в сплаве АМг3, можно объяснить воздействием высококонцентрированного источника нагрева на легкоиспаряющийся магний, и, вероятно, большим содержанием газа в исходном сплаве АМг3 по сравнению со сплавом АМг6. Кроме того, образование пористости объясняется наличием оксидных включений в расплавленном металле, которые и становятся центрами зарождения пор, что хорошо видно на рис. 4, д. Микропористость на границе зазора стыка со швом инициирует образование микротрещин (рис. 4, г). Это можно объяснить имевшим место в ходе эксперимента отклонением источника нагрева от оси стыка, что способствовало образованию несплошностей и несплавлений в корневой части шва.

В соединениях сплава АМг6, полученных с подачей присадочной проволоки и без нее, микротвердость равномерно распределена по всей ши-

рине сварного шва и близка к твердости основного металла (около  $HV 0,05-75$ ), а в центре шва она достигает  $HV 0,05-80$ , что целиком коррелирует с качественной мелкодисперсной структурой, характерной для сварного соединения, полученного лазерной сваркой на больших скоростях.

В соединениях сплава АМг3, полученных без подачи присадочной проволоки, повышение микротвердости наблюдается возле центральной части шва ( $HV 0,05-65$ ). Ближе к зоне сплавления и в основном металле она составляет  $HV 0,05-55$ . Для соединения сплава АМг3, полученного с присадочной проволокой, микротвердость имеет повышенное значение по всей ширине шва и достигает  $HV 0,05-65...70$  в центральной его части. При этом для обоих вариантов структура металла шва в центральной части шва отличается такой же дисперсностью, как и у сплава АМг6, полученного при сварке на высокой скорости. Поэтому разрушение таких соединений при механических испытаниях происходило за пределами швов (в зоне термического влияния) в отличие от соединений, полученных без подачи присадочной проволоки.

Исследование химической неоднородности швов показало, что распределение легкоиспаряющегося легирующего элемента магния в основном металле и металле шва в соединениях из сплавов АМг6 и АМг3, полученных без присадочной проволоки, неоднородное (рис. 5). В обоих случаях наблюдается незначительное (на 1,0...1,5 мас. %) снижение магния в металле шва, о чем свидетельствуют сканиграммы на рис. 5, а, в. В соединениях, полу-

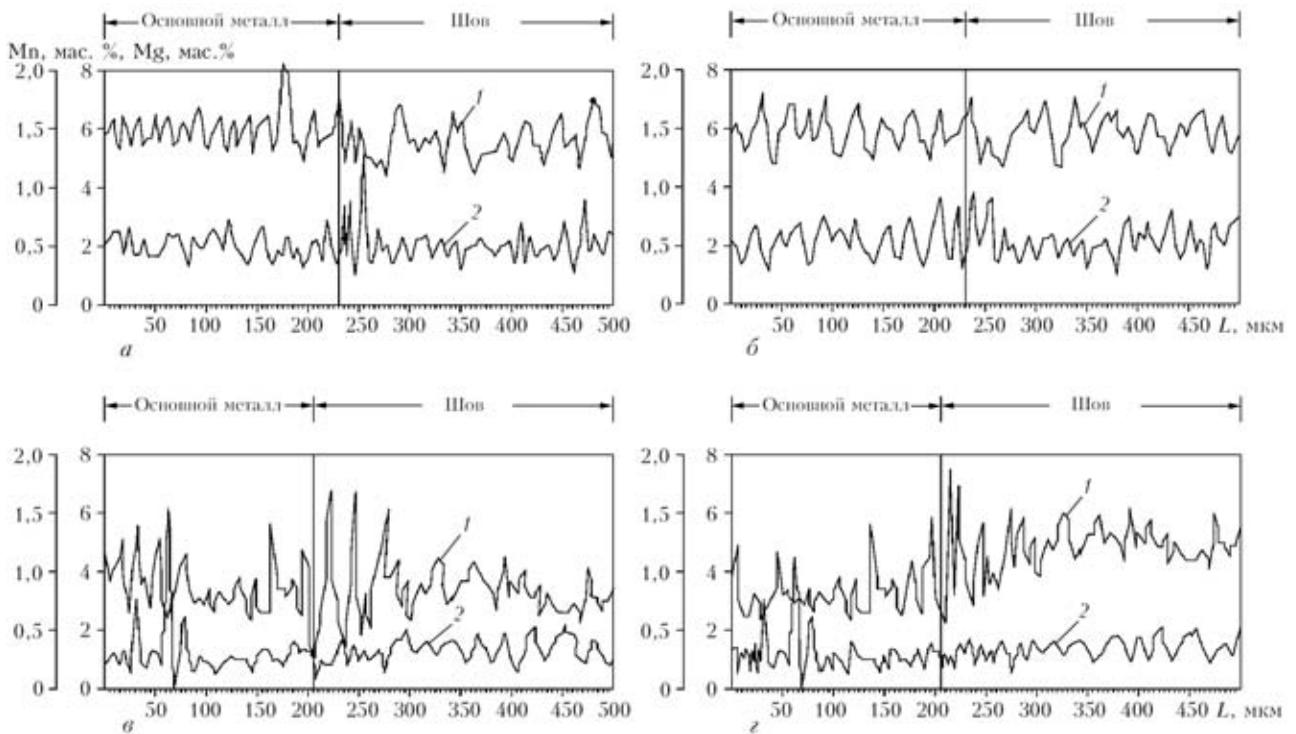


Рис. 5. Распределение магния (1) и марганца (2) в основном металле и металле шва соединений сплава АМг6 (а, б) и АМг3 (в, г), полученных гибридным способом сварки без подачи присадочной проволоки (а, в) и с ее подачей (б, г); L — длина зондируемого участка

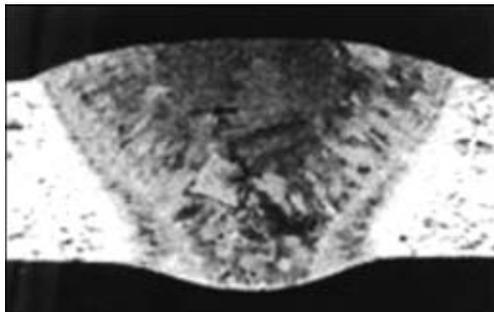


Рис. 6. Макрошлиф (X8) соединения сплава АМг3, полученного гибридным способом сварки с подачей присадочной проволоки

ченных с использованием присадочной проволоки (рис. 5, б, г), можно отметить заметное (почти до 4,5...5,0 мас. %) повышение содержания магния в металле швов сплава АМг3 и однородное его содержание в соединениях АМг6. Повышение содержания магния в соединении сплава АМг3 объясняется введением присадочной проволоки

СвАМг6, а также подтверждается результатами механических испытаний на временное сопротивление разрыву и исследованиями микротвердости этих соединений. Кроме того, как показали радиационный контроль и исследование макрошлифов, в швах, выполненных на сплаве АМг3 гибридным лазерно-плазменным способом с подачей присадочной проволоки, макро- и микропоры отсутствуют (рис. 6). Возможно, это связано со снижением содержания водорода в этих швах за счет введения присадочной проволоки с минимальным газосодержанием. Для проверки этой гипотезы определяли содержание водорода в металле швов (рис. 7, а, б).

Распределение водорода на различных участках стыковых соединений сплава АМг3, полученных гибридным способом сварки без подачи присадочной проволоки, показало, что концентрация водорода по оси шва наиболее высокая (выше, чем в основном металле) за счет диффузии его

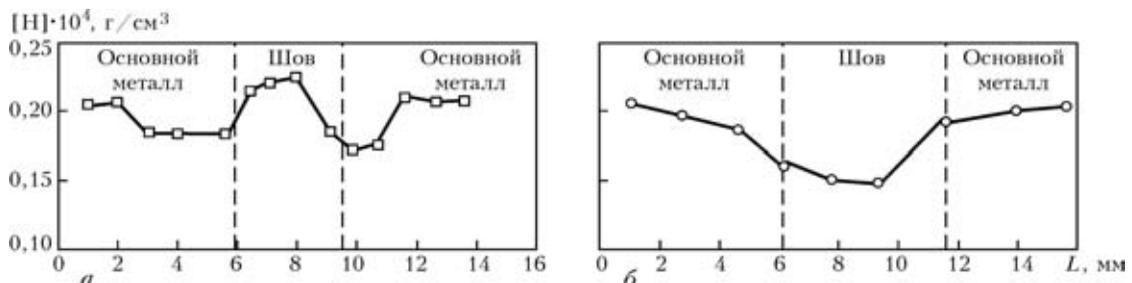


Рис. 7. Распределение водорода в соединениях сплава АМг3, полученных гибридным способом сварки без подачи присадочной проволоки (а) и с ее подачей (б)



из зоны сплавления в металл шва со стороны основного металла (рис. 7, а). Значительная массовая доля водорода в основном металле способствует образованию повышенной пористости в швах, а резкие перепады его провоцируют образование трещин (см. рис. 4, з, д). В соединениях сплава АМгЗ, полученных сваркой с подачей присадочной проволоки, наблюдается заметное снижение содержания водорода в металле шва (рис. 7, б), и, как следствие, отсутствие в нем пор и трещин, что подтверждают результаты механических испытаний (см. табл. 3) и рентгеновская съемка (см. рис. 2, в).

## Выводы

1. Гибридная лазерно-плазменная сварка позволяет в 2...4 раза повысить глубину проплавления алюминиевых сплавов толщиной 1,5...3,0 мм по сравнению с лазерной или плазменной сваркой, и в этих же пределах увеличить скорость сварки по сравнению со сваркой плазменной дугой.

2. В швах соединений сплава АМгЗ, полученных гибридным, лазерным и плазменным способами сварки без подачи присадочной проволоки, выявлено наличие крупных пор. Применение проволоки СвАМг6 при гибридной лазерно-плазменной сварке сплава АМгЗ позволило исключить пористость в швах и повысить временное сопротивление разрыву до 85...90 % по сравнению с основным металлом.

3. Результаты исследований химической микронеоднородности алюминиевых соединений и определения содержания и распределения водорода в них показали, что на пористость швов, полученных лазерно-плазменной сваркой, влияют два основных фактора — содержание магния в металле швов и наличие водорода в основном металле и присадочной проволоке.

1. Арбузов Ю. П. Свариваемые алюминиевые сплавы. — М.: Машиностроение, 1990. — 240 с.
2. Рязанцев В. И., Федосеев В. А. Изготовление сварных криогенных топливных баков из алюминиевых сплавов // Авиац. пром-сть. — 1995. — № 7/8. — С. 9–12.
3. Колганов И. М., Башилов А. С., Богданов Б. В. Изготовление панелей с гнутыми профилями из перспективных алюминиевых сплавов // Там же. — 1994. — № 9/10. — С. 3–5.
4. Братухин А. Г., Редчиц В. В., Лукин В. И. Проблемы создания сварных конструкций для авиакосмической техники // Свароч. пр-во. — 1996. — № 3. — С. 22–25.

5. Рязанцев В. И., Федосеев В. А., Манцев В. Н. Создание сварного кузова автомобиля из алюминиевых сплавов // Там же. — 1999. — № 11. — С. 36–42.
6. Сварка в самолетостроении / Г. А. Кривов, В. Р. Рябов, А. Я. Ищенко и др. — Киев: МИИВЦ, 1998. — 695 с.
7. Рабкин Д. М. Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов. — Киев: Наук. думка, 1986. — 256 с.
8. Рабкин Д. М., Игнатъев В. Г., Довбищенко И. В. Дуговая сварка алюминия и его сплавов. — М.: Машиностроение, 1982. — 95 с.
9. Макаров И. И., Волинский В. Н., Прохоров Н. Н. Влияние пор и окисных включений на прочность сварных соединений сплава АМг6 // Автомат. сварка. — 1976. — № 4. — С. 27–30.
10. Влияние окисных включений на прочность сварных соединений сосудов давления из сплава АМг6 / В. Ф. Лукьянов, В. Н. Фомин, В. П. Мойсеенко и др. // Свароч. пр-во. — 1970. — № 6. — С. 24.
11. О некоторых факторах, влияющих на образование окисных включений в сварных швах из сплава АМг6 / Г. Л. Зубренко, Ф. З. Тэненбаум, В. М. Петрованов и др. // Там же. — 1977. — № 5. — С. 24–27.
12. Влияние способов подготовки свариваемой поверхности на образование пор в швах на сплаве алюминий–магний–литий / В. И. Рязанцев, В. А. Федосеев, В. В. Гришин, Н. В. Ширяева // Автомат. сварка. — 1982. — № 6. — С. 53–54.
13. Структура и свойства соединений, полученных при сварке сплава АМг6 с использованием присадочных проволок со скандием / А. Я. Ищенко, А. В. Лозовская, А. Г. Покляцкий и др. // Там же. — 1999. — № 4. — С. 19–25.
14. Aluminium alloy sheet welding by the laser AC pulsed MIG hybrid process / T. Ueyama, H. Tong, I. Yazawa, M. Hirami // J. Light Metal Welding and Construction. — 2003. — 41, № 12. — P. 567–574.
15. Штауфер Г. Лазерная гибридная сварка // Сварка и соединения 2000. Новые материалы и новые перспективы: Тр. междунар. конф., Израиль, 18–20 июля, 2000 г. — М.: Московское региональное отделение РНТСО, 2000. — С. 53–61.
16. Tusek J. Synergic operation of welding arc and laser beam — for practical application or for scientific research only? // Varilna Tehnika. — 1996. — 45, № 2. — P. 39–46.
17. Diebold T. P., Albright C. E. «Laser-GTA» welding of aluminium alloy 5052 // Welding J. — 1984. — 63, № 6. — P. 18–24.
18. Diltthey U., Lueder F., Wieschenamm. Expanded capabilities in welding of aluminium alloys with laser-WIG hybrid process // Aluminium. — 1999. — 75, № 1/2. — P. 64–75.
19. Гибридная сварка (лазерная + импульсная МИГ на переменном токе) тонколистовых алюминиевых сплавов / Т. Уэяма, Х. Тонг, И. Ядзава и др. // Сварка легких металлов. — 2003. — 41, № 12. — С. 9–16.
20. Гибридная лазерно-микроплазменная сварка металлов малых толщин / Б. Е. Патон, В. С. Гвоздецкий, И. В. Кривцун и др. // Автомат. сварка. — 2002. — № 3. — С. 5–9.
21. Рабкин Д. М., Лозовская А. В., Склабинская И. Е. Металловедение сварки алюминиевых сплавов. — Киев: Наук. думка, 1992. — 160 с.

The process of production of joints in aluminium alloys by the hybrid laser-plasma welding method was investigated. Peculiarities of properties and structure of these joints were studied. The welding experiments were conducted both with and without filler wire, which allowed elimination of porosity of the welded joints and considerable improvement of their properties.

Поступила в редакцию 06.03.2007



## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНОГО СПЛАВА В96цс В УСЛОВИЯХ ВНЕЦЕНТРЕННОГО РАСТЯЖЕНИЯ

Т. М. ЛАБУР, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН Украины А. Я. ИЩЕНКО,  
Т. Г. ТАРАНОВА, В. А. КОСТИН, кандидаты техн. наук,  
чл.-кор. НАН Украины Г. М. ГРИГОРЕНКО (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изучены закономерности зарождения и распространения трещин в сплаве В96цс в условиях внецентренного растяжения. Методом фрактографического анализа установлены причины и механизмы возникновения очагов разрушения на отдельных участках околошовной зоны сварных соединений после различных условий сварочного нагрева.

*Ключевые слова:* алюминиевый сплав, сварочный нагрев, неплавящийся электрод, электронный луч, зона термического влияния, внецентренное растяжение, микроструктура излома, фрактографический анализ, зарождение трещины, распространение трещины, разрушение

Введение циркония и скандия в алюминиевые сплавы обеспечивает формирование бездендритной мелкодисперсной структуры, упрочненной дисперсными выделениями интерметаллидов на основе указанных элементов [1–3]. Уменьшение размеров зерен при введении этих элементов приводит к замедлению распада твердого раствора в алюминиевых сплавах и последующей коагуляции продуктов распада в процессе сварки. Сварные соединения при этом отличаются более высокой прочностью, что позволяет их использовать при создании ответственных сварных конструкций летательных аппаратов с высокими показателями прочности и надежности при эксплуатации [4, 5].

В условиях эксплуатации морфология и химический состав интерметаллидных соединений зачастую определяют процессы зарождения и распространения трещин при разрушении [3–10]. Большой массив данных об особенностях образования и роста микротрещин в алюминиевых сплавах свидетельствует об актуальности и значимости этой проблемы. В указанных работах авторы отмечают, что в алюминиевых сплавах преобладает вязкий характер разрушения, который связан с формированием ямок (микропор) и последующим их слиянием в процессе реализации пластической деформации. Величина ямок определяется размером зерна и расстоянием между включениями. В изломах сложнолегированных алюминиевых сплавов наблюдается неоднородное распределение мелких и крупных ямок.

Информация об особенностях протекания процессов зарождения и распространения трещин в

сварных соединениях высокопрочного алюминиевого сплава В96цс в печати отсутствует. Нами предпринята попытка с помощью качественных подходов растровой электронной микроскопии установить влияние структурной и физической неоднородности, имеющей место в сварных соединениях, на зарождение трещин и характер их распространения. Такой метод исследования не только дополняет имеющиеся сведения, полученные на основе механики разрушения, но и является базой для достоверной экспертизы особенностей возникновения трещин при повреждении сварных конструкций, а также для изучения различных этапов их разрушения.

Характер структурных изменений, которые происходят в металле высокопрочного алюминиевого сплава В96цс при термическом цикле сварки, исследовали с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) JSM-840, оснащенного системой микроанализа «Линк 860/500». Взаимодействие электронного пучка растрового микроскопа со структурными составляющими, содержащими такие элементы, как магний, медь, цирконий, скандий, создает различный контраст изображения изучаемых фаз, благодаря чему появляется возможность получения качественной и количественной оценки влияния формы и размеров частиц на зарождение и распространение трещины в структуре сплава В96цс в зависимости от теплофизических условий нагрева, протекающих в околошовной зоне (ОШЗ) при различных способах сварки плавлением — сварке неплавящимся электродом (СНЭ) и электронно-лучевой сварке (ЭЛС). При этом использовали следующие условия нагрева: перегрев при  $T = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 3 с; закалка при  $T = 460\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 1 ч; отжиг при  $T = 360\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 20 мин; отпуск при  $T = 360\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 3 мин; старение при  $T = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 7 ч. Для моделирования различных условий охлаждения использовали воздух и воду.



Влияние теплофизических условий на характеристики сопротивления разрушению на исследуемых участках ОШЗ сварных соединений сплава В96бс показано на рис. 1.

Анализ рельефа изломов разрушенных образцов показал, что термические условия сварки влияют на структурно-фазовые изменения в металле, содержание фаз и характер распределения их в объеме металла, что в свою очередь оказывает влияние на особенности протекания процессов зарождения и распространения трещин. Во всех изломах разрушения образцов сплава В96бс выявлено у вершины надреза наличие зоны пластической деформации (рис. 2), которая является макроскопической характеристикой разрушения и представляет собой участок излома, где зарождается магистральная трещина в образце при испытании. Действительно, размеры зоны пластической деформации (таблица) определяют влияние структуры сплава на его работоспособность и механические свойства, поскольку структурная чувствительность материала обусловлена особенностями структурных составляющих и соотношением геометрических размеров этой зоны. Пос-

ледние в исследуемых образцах указывают на различный уровень стартового напряженного состояния металла при зарождении трещин, наличие которых, по-видимому, обусловлено содержанием и размерами выделившихся при нагреве фазовых частиц. Их объемная доля определяет длину и количество зародышевых микротрещин, а также характер локального напряжения в окрестности их расположения. Это оказывает влияние на уровень внутренних напряжений и размер зоны пластической деформации. Поскольку радиус в вершине трещины во всех образцах одинаков ( $R = 0,1$  мм), есть все основания утверждать, что размер зоны пластической деформации, а следовательно, и вязкость металла исследуемых образцов определяются внутренними напряжениями, которые зависят от объемной доли включений, а также условий нагрева и охлаждения в процессе сварки. Отметим, что пластическая зона значительной (4,90, 4,49, 3,84 и 2,80 мм) протяженности получена вследствие разрушения образцов в условиях плосконапряженного состояния, когда металл способен активно поглощать энергию пластической деформации.

В отличие от описанного выше случая в образцах в исходном состоянии или после старения протяженность пластической зоны уменьшается на 30...35%. Это указывает на возникновение в них при развитии магистральной трещины условий для упругой деформации, когда релаксация энергии недостаточна для осуществления пластической деформации.

Таким образом, при увеличении объемной доли частиц структурные и фазовые изменения, происходящие в ОШЗ сварных соединений, в процессе их разрушения могут создавать в металле как плоскодеформированное, так и плосконапряженное состояние. Это позволяет говорить о доминирующем влиянии частиц на условия зарождения трещин при разрушении сварных соединений сплава В96бс, от которого зависят значения характеристик вязкости разрушения на всех этапах развития трещины (рис. 2, б-г).

Рассмотрим особенности рельефа в исследуемых образцах, моделирующих состояние сплава В96бс в ОШЗ. В образце, состояние металла которого соответствует зоне сплавления шва с основным металлом, где всегда имеет место перегрев, разрушение происходит параллельно оси прикладываемой нагрузки. На рельефе излома наблюдаются отдельные фрагменты структуры с образовавшимися при нагреве горячими кристаллизационными трещинами (рис. 3, а). При исследовании рельефа участка, содержащего интерметаллидное соединение  $Al_3(Zr, Sc)$ , установлено, что его частицы разрушаются хрупко (рис. 3, б). Частицы более крупного (3...6 мкм) размера отслаиваются от матрицы, а мелкого (0,6...1,5 мкм)

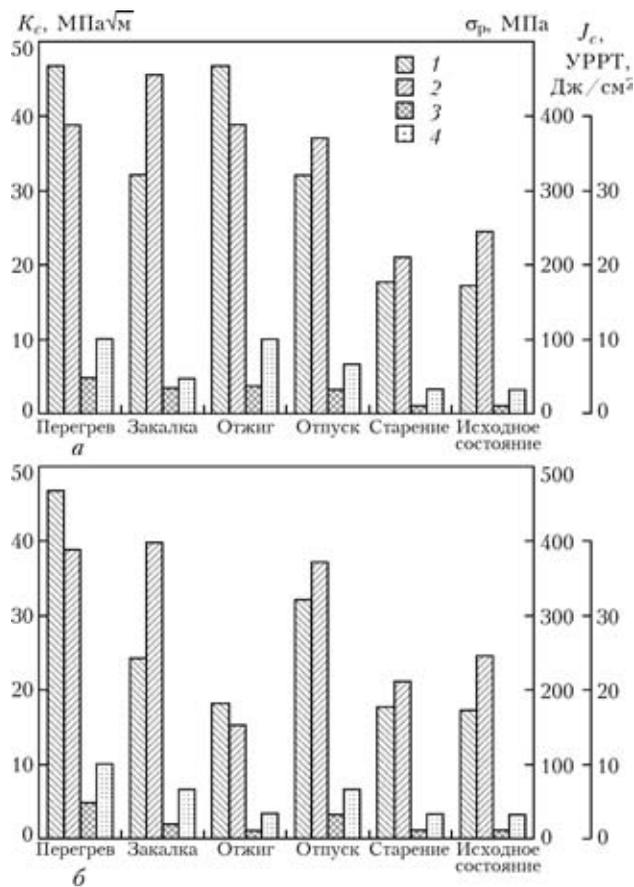


Рис. 1. Зависимость показателей вязкости разрушения сплава В96бс на различных участках ОШЗ от условий нагрева при ЭЛС (а) и СНЭ (б): 1 — критический коэффициент интенсивности напряжения  $K_c$ ; 2 — номинальное разрушающее напряжение  $\sigma_p$ ; 3 — энергия зарождения трещины  $J_c$ ; 4 — удельная работа распространения трещины (УРРТ)

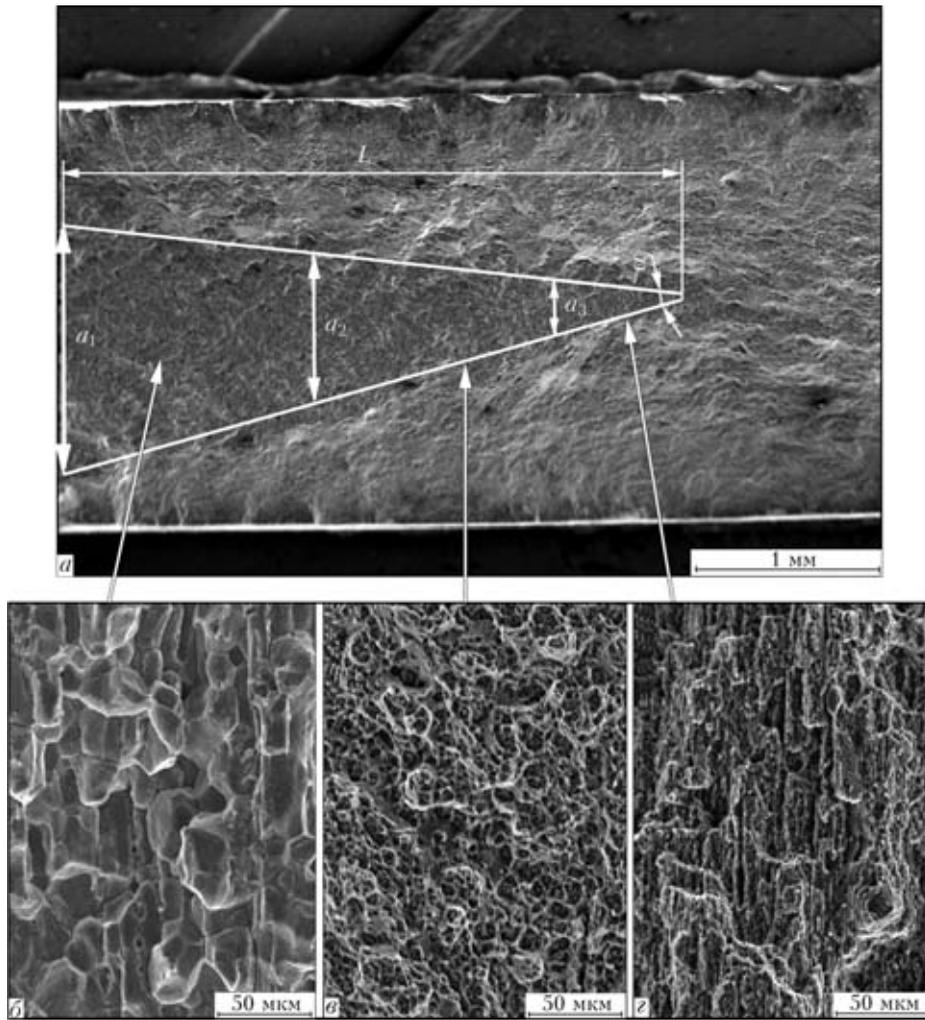


Рис. 2. Геометрические размеры зоны пластической деформации (а) и микроструктура характерных участков поверхности ее разрушения — интеркристаллитного (б), транскристаллитного вязкого (в) и транскристаллитного хрупкого (г)

— сохраняют когерентную связь с матрицей (рис. 3, в). Хрупкий характер разрушения этих частиц может быть обусловлен протеканием процесса сегрегации легирующих и примесных элементов на границах зерен в условиях перегрева (550 °С, 3 с). Распространение образовавшихся при этом микротрещин в дальнейшем происходит по вязкому механизму вследствие высокой пластичности матрицы. Образование очагов разрушения в виде ямок впереди трещины может быть связано с релаксацией напряжения, вызванного скоплением дислокаций высокой плотности, которому предшествует формирование микропустот.

Траектория развития магистральной трещины в исследуемых образцах после нагрева до температуры закалки (460 °С, 1 ч) с последующим охлаждением в воду отличается от имеющей место в основном металле. Очагом зарождения микротрещин в этом случае являются скопления выделившихся включений (рис. 4). Наличие характерных бороздок на поверхности излома, обнаруживаемых при электронно-микроскопических исследованиях, указывает на дискретность процесса развития трещин (рис. 4, а). По мере их перемещения ширина бороздок увеличивается, что, возможно, обусловлено ростом интенсивнос-

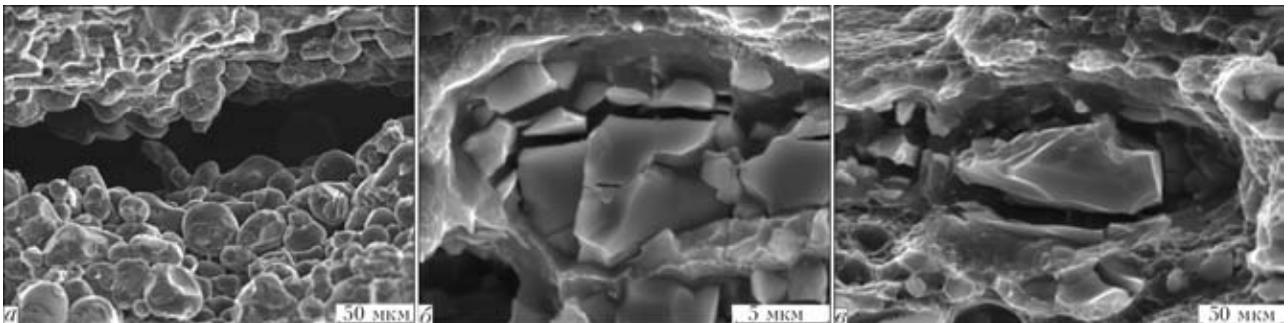


Рис. 3. Фрактограммы поверхности разрушения сплава В96с в состоянии перегрева: а — горячая кристаллизационная трещина; б — сколы интерметаллидных соединений; в — отслоение интерметаллидных соединений от матрицы

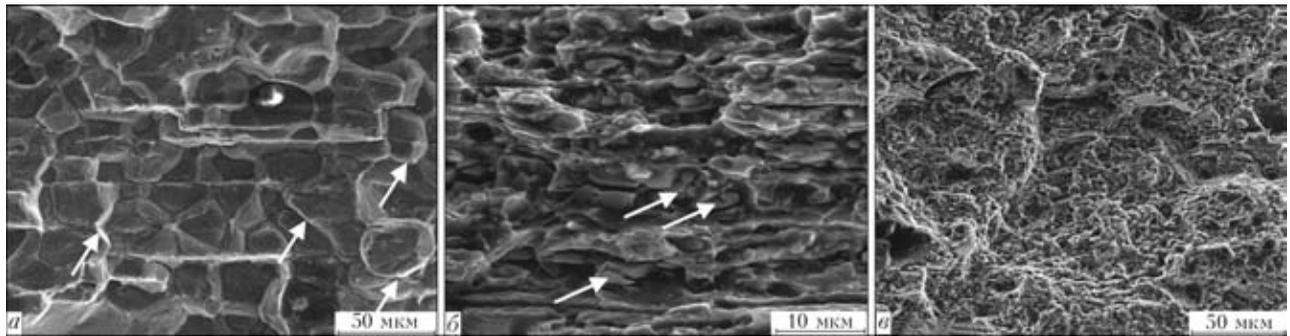


Рис. 4. Фрактограммы поверхности разрушения сплава В96с в состоянии закалки: *а* — участок скопления частиц; *б* — участок вдоль границ зерен; *в* — участок расположения фасеток

ти напряжения на данном участке структуры. На изломе в зоне пластической деформации также наблюдается наличие горячих трещин небольшой протяженности. Кроме того, обнаружены участки структуры, где зарождение трещины начинается с эвтектики (рис. 4, б). В центре излома исследуемого образца очагом зарождения магистральной трещины являются крупные интерметаллидные соединения, содержащие модификаторы  $Al_3(Zr, Sc)$ . Растрескиваясь или расслаиваясь на составные части по мере распространения магистральной трещины, они образуют скопления частиц с различным содержанием скандия (в центре — 15 мас. %, с краю — 26 мас. %) и циркония (в центре — 18 мас. %, с краю — 6 мас. %). По характеру их разрушения можно предположить, что местом действия локального разрушающего напряжения является их центральная часть с последующим развитием расслоения на периферийные области. Продолжительность каждой из стадии образования трещины определяется размером частиц. Причиной действия такого механизма разрушения предположительно является различное соотношение циркония и скандия в металле каждого последующего слоя.

В условиях нагрева сплава В96с до температуры отжига отмечается сокращение длины зоны пластической деформации (см. таблицу). При

этом угол  $\alpha$ , образованный у ее вершины, составляет  $59^{\circ}38'$ . В таком образце имеет место низкое ( $1,1 \text{ Дж/см}^2$ ) значение энергии зарождения трещины, что свидетельствует о значительной хрупкости структурных составляющих сплава при данных условиях термического воздействия. Фазовые превращения, происходящие при этом, приводят к огрублению структурных составляющих, расположенных по границам зерен, что является причиной смешанного характера разрушения образцов сплава (рис. 5, а). Наряду с вязким механизмом образования мелких и неглубоких ямок наблюдаются участки, образовавшиеся по механизму скола, которые проходят по крупным интерметаллидным соединениям (рис. 5, б). Трещина распространяется преимущественно вдоль границ зерен, где в процессе сварочного нагрева формируется легкоплавкая эвтектика (рис. 5, в). Таким образом, охрупчивание сварных соединений сплава В96с, полученных СНЭ, обусловлено процессом огрубления структурных составляющих и образованием значительной объемной доли эвтектик. При этом очагом разрушения являются горячие трещины. Их различная форма (длинные и округлые) и протяженность свидетельствуют о неоднородном напряженном состоянии металла в теплофизических условиях сварки неплавящимся электродом. Содержание частиц интерметаллидного соединения  $Al_3(Zr, Sc)$  незначительное, поэтому они не принимают участие в процессе зарождения трещин.

При охлаждении образца в воде после нагрева до  $T = 360^{\circ}\text{C}$  и выдержке в течение 20 мин, что соответствует термическому циклу ЭЛС, поверхность излома приобретает многочисленные признаки вязкого разрушения. Это приводит к увеличению значений показателей вязкости разрушения (см. рис. 1). При этом в процессе реализации пластической деформации образуются фасетки небольших размеров с гребнями. Очагом зарождения трещин в данном образце являются участки структуры, содержащие фрагменты микропустот в виде горячих трещин. Их малое количество и незначительная протяженность ( $0,2 \dots 0,5 \text{ мм}$ ) обуславливают реализацию вязкого механизма разрушения (рис. 5,

**Влияние термической обработки на геометрические размеры (мм) зоны пластической деформации**

Условия нагрева	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$L$	$\alpha$
Перегрев	1,91	0,94	0,34	4,90	$17^{\circ}33'$
Закалка	1,50	0,73	0,24	3,84	$20^{\circ}14'$
	2,15	1,29	0,99	4,49	$31^{\circ}12'$
Отжиг	1,79	1,30	0,62	2,78	$33^{\circ}09'$
	2,12	1,34	0,50	2,14	$59^{\circ}38'$
Отпуск	2,10	1,32	0,51	2,37	$46^{\circ}10'$
Старение	2,32	1,50	0,53	1,70	$62^{\circ}08'$
Исходное состояние	2,01	1,14	0,40	1,40	$60^{\circ}04'$

Примечание. В числителе приведены результаты испытаний при ЭЛС, в знаменателе — при СНЭ.

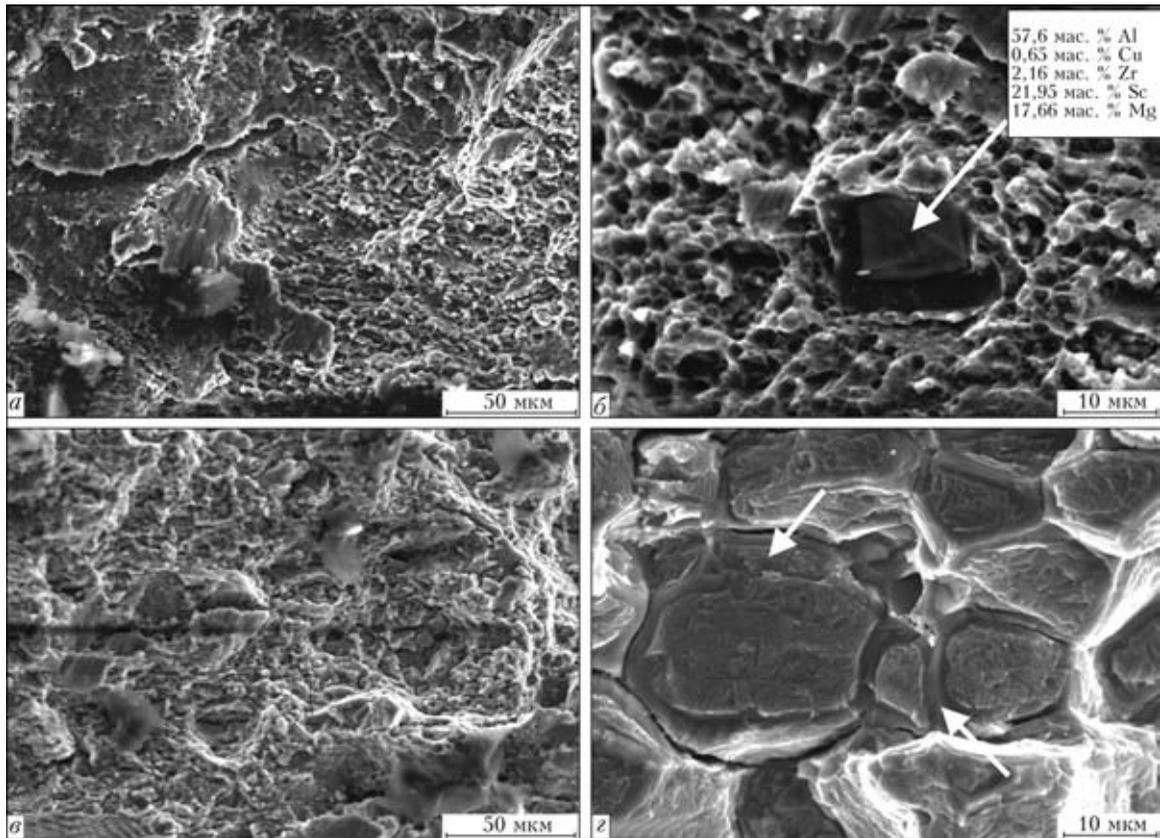


Рис. 5. Фрактограммы поверхности разрушения сплава В96с в состоянии отжига: *а* — участок со смешанным характером разрушения; *б* — сколы интерметаллидного соединения (показаны стрелкой); *в* — участок вязкого разрушения; *г* — эвтектики (показаны стрелками)

*в*) при более высоких значениях показателя энергии зарождения трещины по сравнению с образцом, который был охлажден на воздухе.

В металле в состоянии после отпуска формируется зона пластической деформации небольшой протяженности (2,37 мм, таблица). Наблюдаются малые размеры фасеток, образованных при разрушении (рис. 6, *а*), что обеспечивает достаточно высокие значения всех характеристик вязкости разрушения (см. рис. 1). На поверхности излома обнаружено множество осколков интерметаллидных соединений, расположенных вдоль границ зерен и вытянутых вдоль направления проката ос-

новного металла, что приводит к образованию фасеток такой же формы. Поскольку влияние условий нагрева незначительно, то существенного изменения текстуры сплава по сравнению с основным металлом не наблюдается. Очагом разрушения выступают фазы, содержащие цирконий и скандий. Количественный анализ элементов разрушенных близлежащих осколков таких фаз позволяет предположить, что причиной их разрушения является расслоение, которое возникает в результате слабых атомных связей между слоями вследствие различного содержания в них скандия и циркония (рис. 6, *б*).

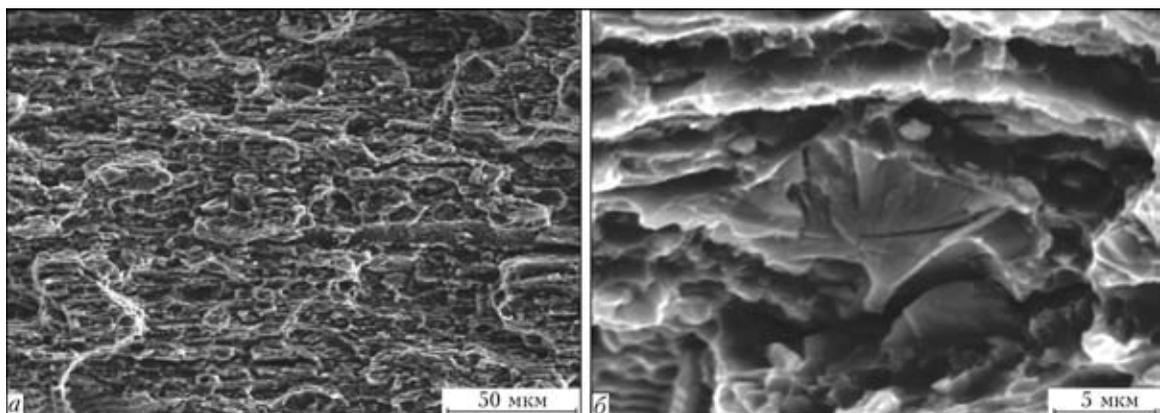


Рис. 6. Фрактограммы поверхности разрушения сплава В96с в состоянии отпуска: *а* — участок со смешанным характером разрушения; *б* — участок расслоения

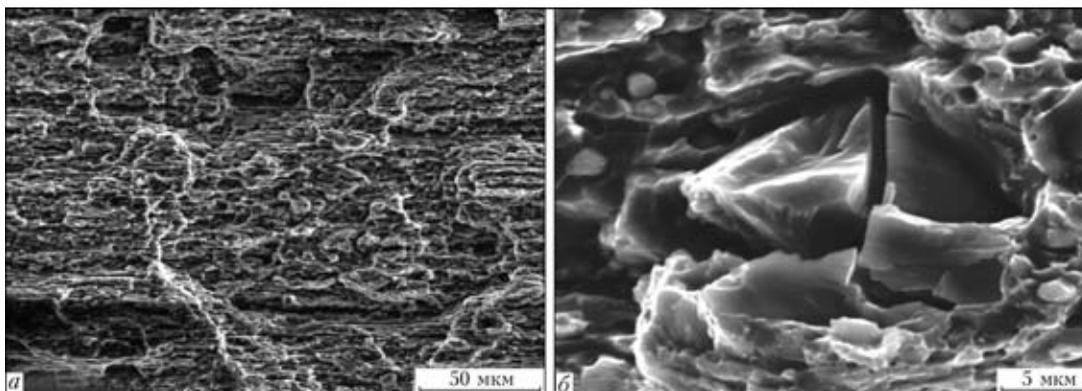


Рис. 7. Фрактограммы поверхности разрушения сплава В96бс в состоянии искусственного старения: *а* — участок со смешанным характером разрушения с расслоением вдоль направления проката; *б* — участок с растрескиванием крупного интерметаллидного соединения

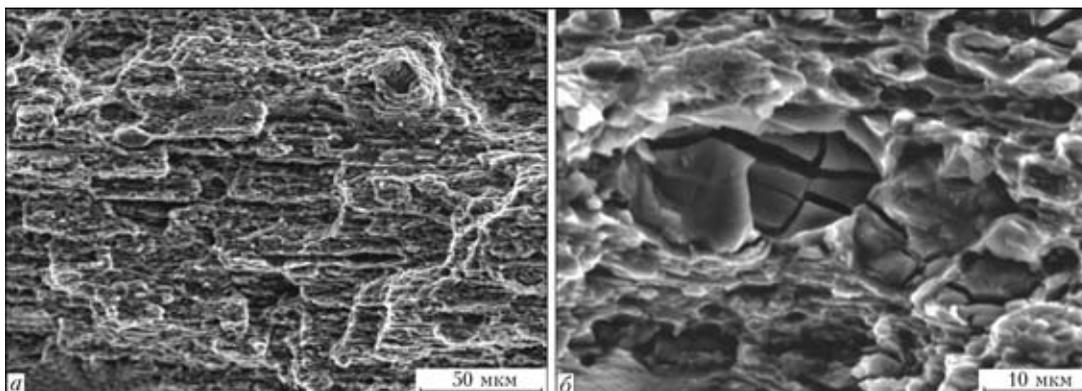


Рис. 8. Фрактограммы поверхности разрушения сплава В96бс в исходном состоянии: *а, б* — см. рис. 7

В образце сплава В96бс, когда металл находится в состоянии после искусственного старения, наблюдается уменьшение протяженности зоны пластической деформации у надреза с 2,37 до 1,70 мм (см. таблицу) и изменение рельефа (рис. 7). Фасетки имеют преимущественно небольшую глубину, малые размеры, они сильно вытянуты вдоль направления проката. Наличие на изломе исследуемого образца признаков как вязкого, так и хрупкого разрушения (рис. 7, *а*) указывает на смешанный характер развития трещины. Ее зарождение происходит по механизму хрупкого скола. Процесс распространения трещины реализуется в ходе пластической деформации матрицы вдоль линий скольжения. Особенностью разрушения крупных частиц, содержащих цирконий и скандий, является растрескивание (рис. 7, *б*). Содержание этих элементов в слоях, образующихся у вершины и основания включения, отличается примерно в 5 раз.

Разрушение сплава В96бс в исходном состоянии имеет смешанный характер, когда одновременно действуют два или больше механизмов разрушения [10]. Это означает, что при испытании в условиях внецентренного растяжения в исследуемом образце возникает взаимодействие между различными факторами. Поэтому характер процесса разрушения сплава В96бс несколько отли-

чается от имеющего место в пластичных алюминиевых сплавах. Подобное поведение металла может реализоваться в условиях, когда уровень напряжения при пластической деформации недостаточен для разрушения по механизму слияния пор. Наличие в изломах частиц, разрушенных сколом, а также участков, образовавшихся по механизму отрыва, свидетельствует о неоднородности механических свойств структурных составляющих сплава В96бс (рис. 8). Значительное количество мелких трещин на включениях подтверждает тот факт, что они зародились на этапе распространения магистральной трещины. Их подрастание происходило по мере приближения фронта магистральной трещины. На границах между зернами рядом с первичными включениями циркония и скандия наблюдаются эвтектические образования. Причем содержание циркония в них в 2 раза меньше, чем скандия.

## Выводы

1. На основании исследований изломов сплава В96бс методом фрактографического анализа определены общие закономерности зарождения и распространения трещин при внецентренном растяжении образцов после различных условий сварочного нагрева.



2. Теплофизические условия нагрева, сопровождающие процесс сварки плавлением (СНЭ и ЭЛС), оказывают существенное влияние на способность сплава В96цс пластически деформироваться вблизи расположения хрупких включений, тем самым противодействуя зарождению трещины. Появление очагов зарождения трещин связано с изменением состояния межзеренного пространства вследствие укрупнения интерметаллидных соединений, образования легкоплавкой эвтектики, а также увеличения размеров и объемной доли фаз и включений. Перегрев металла приводит к развитию неоднородности по содержанию легирующих элементов и примесей в связи с их сегрегацией вдоль границ зерен, образования хрупких межзеренных прослоек из пересыщенных фаз, особенно на границе сплавления, где прослойки формируют плотный каркас вокруг зерен. Связанное с этим повышение уровня концентрации напряжения облегчает зарождение трещины вследствие растрескивания фаз или нарушения контакта с матрицей, что снижает показатели прочности и вязкости сплава В96цс:  $\sigma_p = 211$  МПа;  $K_c = 17,7$  МПа $\sqrt{м}$ ;  $J_c = 1,1$  Дж/см<sup>2</sup>; УРРТ = 3,2 Дж/см<sup>2</sup>.

3. Развитие магистральной трещины в сплаве В96цс происходит преимущественно в результате отрыва металла, направленного перпендикулярно приложению нагрузки. Оно сопровождается растрескиванием фаз, содержащих легирующие элементы, и расслоением включений, в состав которых входят цирконий и скандий.

растрескиванием фаз, содержащих легирующие элементы, и расслоением включений, в состав которых входят цирконий и скандий.

1. *Закономерности* легирования алюминиевых сплавов скандием / В. И. Елагин, В. В. Захаров, Т. Д. Ростова, Ю. А. Филатов // Вест. ноу-хау. — 1993. — № 2. — С. 62–66.
2. *Захаров В. В., Ростова Т. Д.* Полосы сдвига в алюминиевых сплавах, содержащих скандий и литий // *Металловедение и терм. обраб. мет.* — 1996. — № 4. — С. 18–21.
3. *Фридляндер И. Н.* Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970–2000 и 2001–2015 гг. // *Технология легких сплавов.* — 2002. — № 4. — С. 12–17.
4. *Ищенко А. Я., Лабур Т. М.* Свариваемые алюминиевые сплавы со скандием. — Киев: МИИВЦ, 1999. — 114 с.
5. *Давыдов В. Г.* Металловедческие и технологические исследования алюминиево-литиевых сплавов на современном этапе // *Технология легких сплавов.* — 1997. — № 5. — С. 15–25.
6. *Кишкина С. И.* Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов. — М.: Металлургия, 1981. — 280 с.
7. *Гордеева Т. А., Жегина И. П.* Анализ изломов при оценке надежности материалов. — М.: Машиностроение, 1978. — 199 с.
8. *Расчеты и испытания на прочность в машиностроении, классификация видов поверхностей разрушения (изломов) металлов.* — М.: Изд-во стандартов СССР, 1989. — 45 с.
9. *Романив О. Н.* Структурная механика разрушения — новое перспективное направление в проблеме разрушения металлов // *Физико-хим. механика материалов.* — 1981. — № 4. — С. 28–32.
10. *Фрактография и атлас фрактограмм: Справоч.* — М.: Металлургия, 1982. — 489 с.

Regularities of initiation and propagation of cracks in V96tss alloy under the conditions of off-center tension have been studied. Fractographic analysis was used to establish the causes and mechanisms of initiation of fracture sites in individual sections of the welded joint HAZ after different conditions of welding heating.

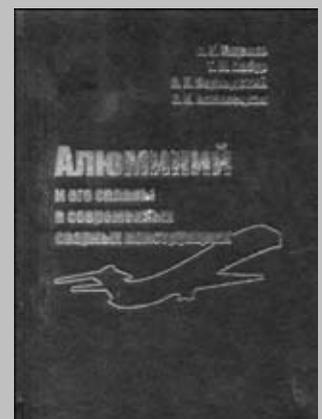
Поступила в редакцию 01.02.2006

## НОВАЯ КНИГА

**Алюминий и его сплавы в современных сварных конструкциях / А. Я. Ищенко, Т. М. Лабур, В. Н. Бернадский, О. К. Маковецкая.** — Киев: Эко-технология, 2006. — 112 с.

Книга состоит из двух частей. В первой части представлена систематизированная экономико-статистическая информация о мировом производстве и потреблении алюминиевой продукции, во второй части — техническая информация об алюминиевых сплавах для сварных конструкций, основных технологиях их соединения и наиболее перспективных областях применения алюминия в сварных конструкциях.

Расчитана на инженерно-технических работников, студентов вузов и учащихся средних специальных учебных заведений.





## СВАРКА И НАПЛАВКА ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ

Чл.-кор. НАН Украины **М. Л. ЖАДКЕВИЧ**, **Н. Г. ТРЕТЯК**, канд. техн. наук, **П. М. КАВУНЕНКО**, инж.,  
**В. И. ЗЕЛЕНИН**, **В. А. МОХОРТ**, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**Е. В. ЗЕЛЕНИН**, инж. (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Изучены особенности структуры сварных и наплавленных соединений латуни Л60 и меди М1, полученных сваркой трением с перемешиванием. Отмечено высокое качество швов, отсутствие дефектов и неоднородностей в зоне сварки. Разработана технология наплавки меди трением с перемешиванием путем выполнения прорезных швов с перекрытием.

*Ключевые слова:* сварка и наплавка трением с перемешиванием, латунь, медь, фазовый состав, медный кристаллизатор

Процесс сварки трением с перемешиванием (СТП), разработанный в 1991 г. в Британском институте сварки [1], позволяет выполнять стыковые, угловые и нахлесточные соединения листовых заготовок. Основными параметрами режима процесса СТП являются скорость сварки (скорость перемещения инструмента), частота вращения инструмента, усилие прижатия и усилие перемещения инструмента, угол наклона инструмента и его размеры [2]. Кроме того, учитываются условия трения, зависящие от используемого материала инструмента и свариваемого материала, и напряжение течения материала заготовок при температуре деформации.

Наиболее широко этот способ сварки применяется для соединения алюминия и его сплавов в судостроении, железнодорожном транспорте, автомобилестроении, строительстве [2–4], а также для соединения медных сплавов, например, медных контейнеров для хранения ядерных отходов [5, 6] или медных подкладок (разновидность теплоотводов) в оборудовании для напыления.

На основе СТП авторами разработана технология наплавки трением с перемешиванием (НТП) меди и ее сплавов. Схема этого процесса приведена на рис. 1. Наплавляемая деталь и присадочный материал в виде пластины закрепляются с помощью прижимов. Вращающийся рабочий инструмент вводится в соприкосновение с присадочной пластиной и постепенно погружается в нее до упора в заплечик инструмента. От трения инструмента о поверхность присадочной пластины и наплавляемой заготовки выделяется тепло, необходимое для перехода в пластичное состояние присадочного материала и части металла детали. Посредством перемещения инструмента

обеспечивается получение прорезного шва. Последовательное наложение таких швов с перекрытием позволяет наплавлять на деталь присадочный материал.

Эксперименты по сварке и наплавке проводили с использованием пластин из меди М1 (ГОСТ 859–78) толщиной 5 и 20 мм и латуни Л60 (ГОСТ 15527–70) толщиной 6 мм. Сварку и наплавку выполняли на специально оборудованном фрезерном станке с мощностью привода 10 кВт (рис. 2).

Процессы СТП и НТП осуществляли при скорости вращения шпинделя 900...1250 об/мин и скорости перемещения инструмента 50...70 мм/мин. Рабочий инструмент, изготовленный из жаропрочного материала на основе вольфрама, имел относительно простую конструктивную форму (диаметр заплечика 25 мм). Угол наклона инструмента к поверхности свариваемой или наплавляемой заготовки составлял 2...3°. При наплавке на заготовку толщиной 20 мм плита толщиной 5 мм использовалась как присадочный материал.

Макро- и микроструктуры металла поперечного сечения образца первоначально исследовали

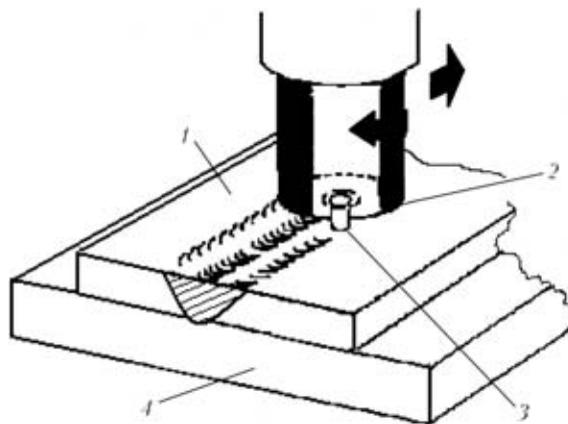


Рис. 1. Схема процесса НТП: 1 — присадка; 2 — заплечик; 3 — штырь со специальным профилем; 4 — медная заготовка



с помощью микроскопа МБС-10. Образцы шлифовали, полировали, а затем в течение 60 с подвергали травлению в специальном растворе, состоящем из 10 г ортофосфорной кислоты, 0,3...0,4 г хромового ангидрида и двух капель перекиси водорода. Микроструктуру и химический состав металла исследовали с помощью растрового электронного микроскопа-микроанализатора РЕММА-101А. Твердость *HRB* определяли по стандартной методике, а фазовый состав — рентгеновским дифрактометрическим методом.

Внешний вид полученного соединения приведен на рис. 3. На рисунке видно, что лицевая поверхность шва гладкая со следами от заплечика. Анализ макрошлифов соединений показал отсутствие дефектов в виде пор, трещин, несплошностей.

На рис. 4 представлено распределение различных структурных зон в сечении сварного шва [7].

Металлографический анализ показал, что основные изменения структуры происходят в зонах *C* и *D*, где в основном и имеет место перемешивание металла при сварке. Размер зерна в центре сварного (в зоне ядра) шва значительно отличается от размера зерна основного металла. На рис. 5, *a* приведена микроструктура основного металла, состоящая из двух фаз  $\alpha + \beta_{II}$  со средним размером зерна 50...60 мкм, а на рис. 5, *б* — микроструктура металла зоны рекристаллизации сварного образца из латуни, зерна в которой измельчились до 5...7 мкм. При этом в зоне ядра изменения химического состава не происходят, что подтверждает микрорентгеноспектральный анализ.

Изменение твердости в зависимости от расстояния от центра шва в его поперечном сечении приведено на рис. 6. Твердость металла зоны перемешивания на *HRB* 10...12 выше, чем у основного металла.

Результаты химического и микрорентгеноспектрального анализа основного металла и металла шва, представленные на рис. 7, свидетельствуют о наличии одних и тех же структурных зон, состоящих из фаз  $\alpha + \beta_{II}$ , и отсутствии изменений в химическом составе металла сварного шва по сравнению с основным металлом.

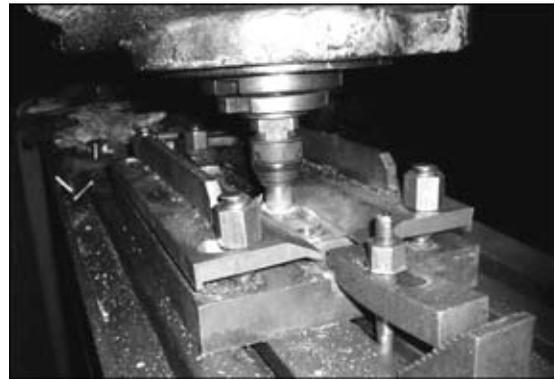


Рис. 2. Лабораторная установка для СТП и НТП



Рис. 3. Лицевая поверхность соединения латуни Л60, полученного СТП

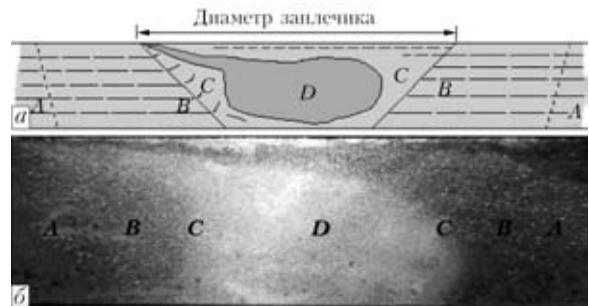


Рис. 4. Схема расположения структурных зон при СТП (*a*) [8] и макроструктура (X5) соединения латуни (*б*): *A* — основной металл; *B* — зона термического влияния; *C* — зона термомеханического влияния; *D* — динамическая рекристаллизация (ядро)

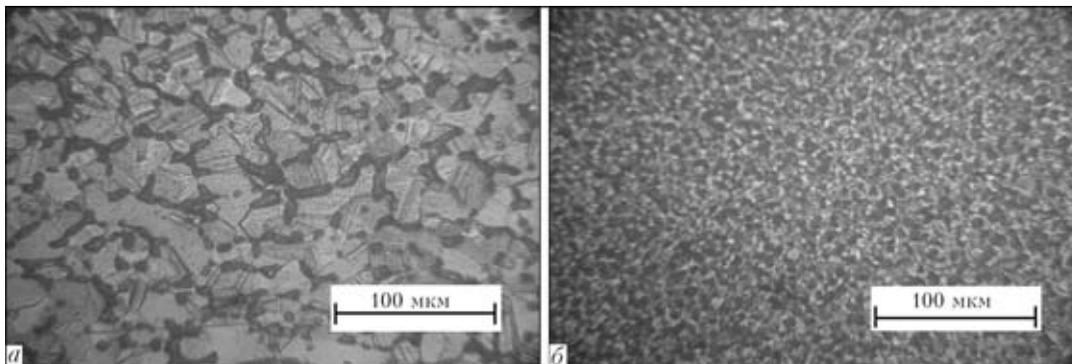


Рис. 5. Микроструктура основного металла (латунь Л60) (*a*) и металла в зоне ядра шва (*б*)

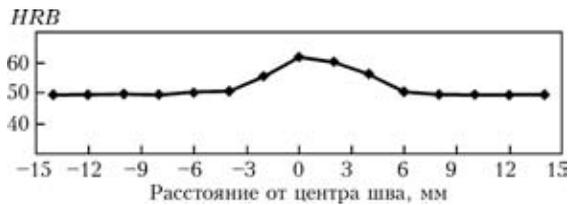


Рис. 6. Распределение твердости в соединении, полученном СТП, латуни Л60 толщиной 6 мм

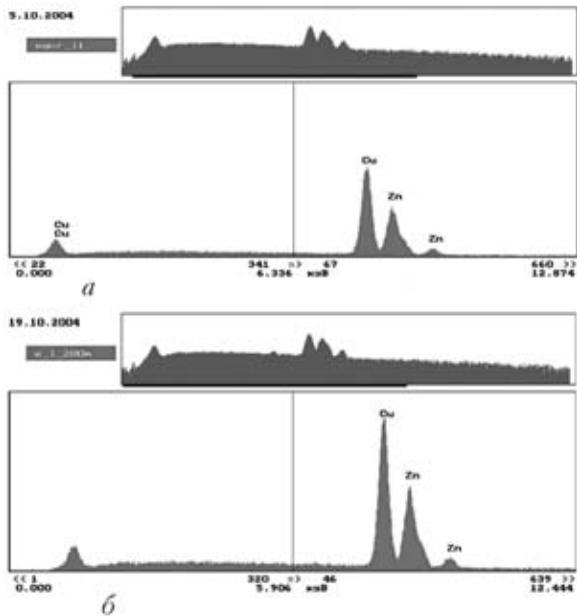


Рис. 7. Энергетический спектр элементов в основном металле — латуни Л60 (а) и в зоне ядра (б)



Рис. 8. Макроструктура (X5) металла наплавленного слоя меди М1

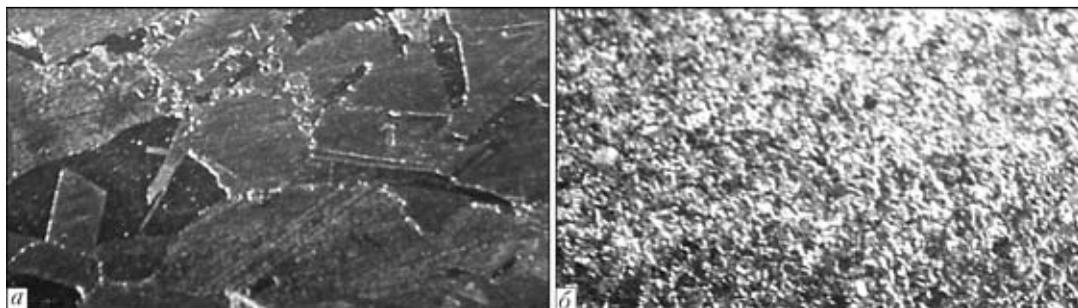


Рис. 9. Микроструктура (X25) основного металла (а) и наплавленного слоя меди М1 (б)

Последнее подтверждает перспективность использования способа СТП для соединения сплавов меди, содержащих легкоиспаряющиеся элементы. Так, в работе [8] отмечается, что при сварке латуни плавлением происходит испарение цинка, которое не только существенно изменяет химический состав металла шва и его механические свойства, но и может привести к образованию большого количества пор, что отрицательно влияет на прочностные характеристики шва. Это ограничивает применение сварных изделий при больших градиентах температур и механических нагрузках.

В ходе экспериментов по НТП меди и ее сплавов установлена возможность получения поверхностного слоя высокого качества без наличия дефектов и неоднородностей в зоне перемешивания (рис. 8), где металл в результате динамической рекристаллизации имеет зерно более мелкого размера по сравнению с основным металлом, что в свою очередь приводит к повышению служебных характеристик наплавленного материала.

Металлографический анализ образцов, вырезанных из наплавленных медных заготовок, показал, что размер зерна в зоне перемешивания существенно отличается от размера зерна основного металла. Установлено, что при перемешивании происходит значительное (в 5...10 раз) измельчение зерна при наличии одних и тех же структурных зон (рис. 9).

При выполнении НТП на медных образцах существенного изменения в твердости наплавленного металла не произошло. Твердость металла зоны перемешивания на 10 % больше, чем основного металла. Деформации, вызванные сварочными напряжениями, отсутствовали. Результаты химического анализа металла наплавленного слоя и основного металла подтвердили идентичность их химического состава и отсутствие оксидных включений в зоне наплавки.

На основании проведенных экспериментов с целью восстановления исходных размеров наплавлены образцы из плиты медного кристаллизатора машин непрерывной разливки стали (рис. 10). Для реализации указанной технологии наплавки в промышленном масштабе разработана



Рис. 10. Вид наплавленного фрагмента плиты медного кристаллизатора машины непрерывной разливки стали

конструкция головки для СТП и НТП, которая может быть применена в составе серийных порталных металлообрабатывающих станков. При этом толщина свариваемых заготовок или наплавленного слоя может достигать 20...30 мм.

### Выводы

1. При СТП латуни Л60 получены качественные швы без наличия дефектов и изменения химического состава в зоне перемешивания. При этом твердость металла шва возростала на 15...20 % по сравнению с основным металлом.
2. Разработана принципиально новая технология НТП меди путем выполнения прорезных швов с перекрытием.

Features of structure of welded and surfaced joints of brass L60 and copper M1 produced by friction stir welding have been studied. A high quality of the welds, absence of defects and inhomogeneities in the welding zone are noted. A technology has been developed of copper surfacing by friction stir welding by making through-thickness welds with an overlap.

3. Наплавлены фрагменты плиты медного кристаллизатора машины непрерывной разливки стали и разработана конструкция головки для реализации промышленной технологии НТП.

1. *Eur. Pat. Spec 0615480B1*. Improvements relating to friction welding / W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham et al. — Publ. 1995.
2. *Process optimisation of friction stir welding in fabrication of aluminium ship panel* / O. T. Midling, M. Hval, H. G. Johansen, L. D. Oosterkamp // Proc. Third intern. forum aluminium ships. — Haugesund, May 27–28, 1998. — Haugesund, 1998. — P. 2–10.
3. *Application of friction stir welding to the manufacturing of the next generation «A-train» type rolling stock* / T. Kawasaki, T. Makino, S. Todori et al. // 2nd Intern. symp. on FSW, Gothenburg, Sweden, June, 2000. — Gothenburg, 2000. — P. 26–28.
4. *Johnsen M. R.* Friction stir welding takes off at Boeing // *Welding J.* — 1999. — Feb. — P. 35–39.
5. *Cederqvist L.* A weld that lasts for 100,000 years // *Svetsaren.* — 2005. — 60, № 2. — P. 31–33.
6. *Fabrication of backing plate of copper alloy by friction stir welding* / Okamoto Kazutaka, Hirano Satoshi, Doi Masayuke et al. // *Jap. Weld. Soc.* — 2002. — 70. — P. 192–193.
7. *Threadgill P.* Friction stir welds in aluminium alloys — preliminary microstructural assessment // *TWI Bulletin.* — 1997. — March/Apr. — P. 30–33.
8. *Абрамович В. П., Деменцевич В. П., Ефимов Л. А.* Сварка плавлением меди и сплавов на медной основе. — Л.: Машиностроение, 1988. — 215 с.

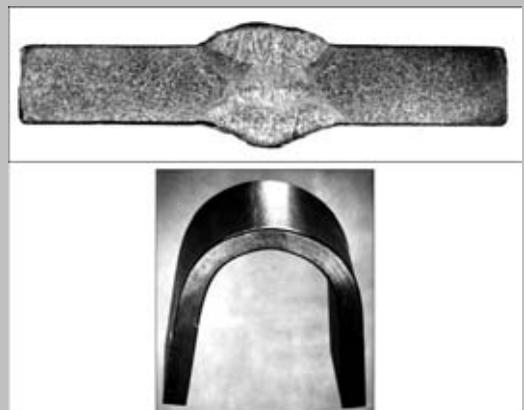
Поступила в редакцию 25.12.2006

## ПОРОШКОВАЯ ПРОВОЛОКА ППС-АН2 ДЛЯ ПОДВОДНОЙ СВАРКИ

Предназначена для сварки под водой на глубине до 20 м металлоконструкций из малоуглеродистых и низколегированных сталей с пределом текучести до 350 МПа. Обеспечивает получение механических свойств на уровне (не менее):  $\sigma_T = 350$  МПа,  $\sigma_B = 430$  МПа,  $\delta = 16\%$ ,  $KCV_{-20} = 30$  Дж/см<sup>2</sup>.

Соответствует требованиям класса В+. Классификации по подводной сварке ANSI/AWS D3.6.

**Область применения.** Ремонт судов на плаву, трубопроводов, портовых сооружений и т.п.



Макрошлиф сварного соединения и образец после испытания на изгиб

**Контакты:** 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11  
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 18  
Тел./факс: (38044) 287 31 84. E-mail: maksimov@paton.kiev.ua



## СВАРКА ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ (Обзор)

Чл.-кор. НАН Украины А. Я. ИЩЕНКО, С. В. ПОДЪЕЛЬНИКОВ, инж., А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, канд. техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены современное состояние сварки трением с перемешиванием, конструкции рабочего инструмента, типы соединений при использовании данного способа сварки, особенности формирования соединений различных алюминиевых сплавов и их свойства. Описаны основные области применения сварки трением с перемешиванием.

*Ключевые слова:* сварка трением с перемешиванием, алюминиевые сплавы, сварочный инструмент, структура сварных соединений, свойства швов, области применения, сварные конструкции

Способ сварки трением с перемешиванием (СТП) был разработан Британским институтом сварки (TWI) в 1991 г. [1]. Интенсивное изучение этого процесса с целью совершенствования технологии и создания нового оборудования позволило найти его эффективное применение при производстве высокотехнологичных изделий в таких отраслях, как вагоно-, судо-, авиастроение и многих других. СТП, относящийся к процессам соединения материалов в твердой фазе, лишен недостатков, присущих процессам сварки с расплавлением металла. Исследователи данного процесса считают, что если 10 % общего объема сварных соединений в США заменить СТП, то будет достигнуто на 500 млн фунтов/год меньше выделений парникового газа. Расчетная экономическая выгода промышленности США от внедрения СТП в промышленное производство составляет 4,9 млрд дол. в год [2].

Сущность процесса заключается в следующем (рис. 1). Для сварки используют инструмент в форме стержня, состоящий из двух основных частей: заплечика или бурта (утолщенная) и наконечника (выступающая часть). Размеры этих конструктивных элементов выбирают в зависимости от толщины и материала свариваемых деталей. Длину наконечника устанавливают приблизительно равной толщине детали, подлежащей сварке. Диаметр заплечика может изменяться от 1,2 до 25 мм. Вращающийся с высокой скоростью инструмент в месте стыка вводится в соприкосновение с поверхностью заготовок таким образом, чтобы наконечник внедрился в заготовки на глубину, примерно равную их толщине, а заплечик коснулся их поверхности. После этого инструмент перемещается по линии соединения со скоростью сварки. В результате трения происходит нагрев

металла вплоть до пластического состояния, перемешивание его вращающимся инструментом и вытеснение в освобождающееся пространство позади движущегося по линии стыка инструмента. Объем, в котором формируется шов, ограничивается сверху заплечиком инструмента. По окончании сварки вращающийся инструмент выводят из стыка за пределы заготовки. В связи с асимметрией структуры швов в поперечном сечении сварных соединений, полученных СТП, принято различать сторону набегания, где направление вращения инструмента совпадает с направлением сварки, и противоположную сторону — отхода.

СТП в основном применяют для соединения материалов со сравнительно низкой температурой плавления, прежде всего алюминиевых [3] и магниевых сплавов [4]. Выполнена успешная сварка данным способом медных [5], никелевых и титановых сплавов [2], а также сталей [6]. С помощью СТП сваривают алюминиевые сплавы толщиной до 75 мм за один проход [7]. СТП позволяет получать нахлесточные соединения алюминиевых листов толщиной от 0,2 мм [8]. Скорость сварки сплава 6082 толщиной 5 мм может достигать 6 м/мин [9].

Основными параметрами процесса СТП являются: скорость сварки, частота вращения инструмента, усилия прижатия и перемещения инструмента, угол наклона инструмента, его размеры.

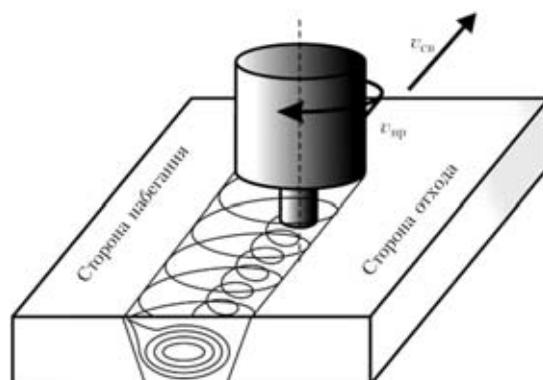


Рис. 1. Схема процесса СТП

Усилия прижатия и перемещения зависят от типа свариваемого материала, его толщины и скорости сварки. Сварка образцов из сплава 7010-T7651 толщиной 6,35 мм при изменении скорости сварки в диапазоне от 59 до 159 мм/мин и скорости вращения инструмента от 180 до 660 об/мин показала, что при увеличении скорости вращения возрастает тепловложение в металл и в сварном соединении формируется микроструктура с более однородными зернами [10]. При этом до определенного предела также повышаются прочностные и пластические свойства. При повышении скорости сварки необходимо увеличивать скорость вращения инструмента для достижения оптимальных условий. Однако для полного отсутствия дефектов, а также обеспечения всех необходимых свойств, надежности и технологичности следует строго выбирать режимы, оптимально подходящие для определенной продукции.

Большинство исследователей указывают на следующие преимущества СТП по сравнению с другими способами получения неразъемных соединений [11, 12]:

- сохранение в значительной мере свойств основного металла в зоне сварки по сравнению со способами сварки плавлением;

- отсутствие вредных испарений и ультрафиолетового излучения в процессе сварки;

- возможность получения бездефектных швов на сплавах, которые при сварке плавлением склонны к образованию горячих трещин и пористости в металле швов;

- отсутствие необходимости в применении присадочного материала и защитного газа, удаления поверхностных оксидов на кромках перед сваркой, а также шлака и брызг после сварки;

- отсутствие потерь легирующих элементов в металле шва.

Уровни выделений Cr, Cu, Mn, Cr<sup>+6</sup> при СТП сталей по сообщению Rockwell Scientific (США) значительно ниже (< 0,03, < 0,03, < 0,02 и < 0,01 мг/мм<sup>3</sup> соответственно), чем при аргонодуговой сварке (соответственно 0,25; 0,11; 1,88 и 0,02 мг/мм<sup>3</sup>) [2]. Сравнение затрат в производстве при использовании СТП и сварки плавящимся электродом (СПЭ) показало, что начальные капиталовложения при СТП более высокие, но с увеличением объемов производства применение СТП становится экономически выгоднее, чем дуговой сварки [11].

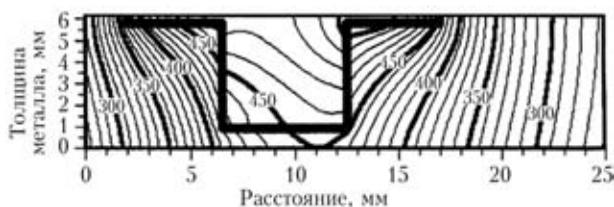


Рис. 2. Распределение температур в продольном сечении образца

Судя по экспериментальным результатам TWI, максимальная температура при СТП составляет около 70 % температуры плавления и для алюминия не превышает 550 °С. Тепловложение при СТП меньше, чем при аргонодуговой сварке примерно в 2 раза и для сплава 6N01-T5 толщиной 4 мм составляет соответственно 190 и 390 Дж/мм (скорость сварки 500 мм/мин) [13]. С помощью математического моделирования тепловых процессов при СТП в работе [14] построено распределение температур в свариваемой пластине (рис. 2). Более низкая температура металла зоны соединения при СТП по сравнению со СПЭ объясняет меньший уровень угловых деформаций в сварном соединении. При СТП угловая деформация равна 1/5...1/7 значений при СПЭ [12] (рис. 3).

Предполагается, что при СТП из-за невысокого уровня температур нагрева металла остаточные напряжения в нем низкие. Жесткое закрепление налагает большие ограничения на деформацию пластин, что препятствует сокращению металла при охлаждении зоны динамической рекристаллизации и зоны термического влияния (ЗТВ) в продольном и поперечном направлении, приводя к поперечным и продольным остаточным напряжениям. При СТП сплавов 2024-T3 и 6013-T6 обнаружено, что продольные остаточные напряжения выше поперечных (скорость сварки составляла 300...1000 мм/мин, скорость вращения инструмента 1000...2500 об/мин). Высокие растягивающие напряжения наблюдаются преимущественно в металле ЗТВ. При снижении скорости сварки и скорости вращения инструмента остаточные напряжения уменьшаются. Максимальные значения продольных растягивающих напряжений достигают 30...60 % предела текучести сварного соединения и 20...50 % предела текучести основного металла [15].

Макроструктура сварных соединений при СТП характеризуется особенностями, не свойственными швам, полученным способами сварки плавлением. Типичным для СТП является образование в центре соединения ядра с овальными концентрическими кольцами, различающимися структурой [16]. К ядру примыкает сложный профиль, который характерен для верхней части шва. Наличие овальных колец обусловлено особенностями перемешивания металла наконечником инструмента. В сварном соединении при СТП выделяют четыре зоны, которые схематически пред-



Рис. 3. Сравнение угловой деформации при СТП (нижний образец) и СПЭ (верхний) (алюминиевый сплав серии 6000, толщина 2 мм)



Рис. 4. Схема зон стыкового соединения, выполненного СТП (обозначения см. в тексте)

ставлены на рис. 4. Непосредственно к зоне А (основной металл) примыкает зона В, где металл заготовок остается недеформированным и изменяет свою структуру только под воздействием нагрева (ЗТВ). Зона С, где металл подвергается значительным пластическим деформациям и нагреву, названа зоной термомеханического влияния. Зона D — ядро соединения, где происходит динамическая рекристаллизация. Твердость металла уменьшается в направлении от основного металла к центру шва и минимальное значение достигается в металле ЗТВ (рис. 5). Снижение твердости в металле ЗТВ происходит в результате перестаривания, уменьшения плотности дислокаций либо за счет обоих этих механизмов.

О высоком уровне механических свойств сварных соединений сообщают многие исследователи. При СТП у сварного соединения сплава 6082-T6  $\sigma_B = 245$  МПа, тогда как у основного металла  $\sigma_B = 317$  МПа. Для 6082-T4, состаренного после сварки,  $\sigma_B = 308...310$  МПа. Испытания на усталость свидетельствуют о более высоком уровне механических свойств соединений при СТП по сравнению с аналогичными при аргонодуговой сварке [18].

Авторы работы [19] проводили исследования механических свойств соединений, полученных СТП сплава 5083 при криогенных температурах, что представляло интерес при подготовке производства емкостей для сжиженного водорода. Образцы толщиной 30 мм были сварены со скоростью 40 мм/мин. Исследования при 77 К в жидком азоте, при 20 К в жидком водороде и при 4 К в жидком гелии показали, что уровень свойств

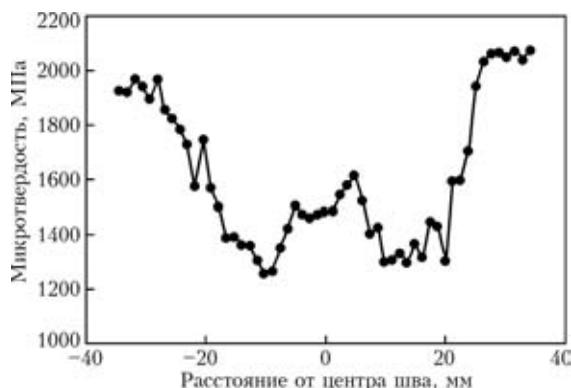


Рис. 5. Распределение твердости в зоне сварного соединения сплава 7075-T7351 [17]

соединений при СТП выше, чем при аргонодуговой сварке.

Проблемами СТП литейных алюминиевых сплавов занимались авторы работы [20]. В промышленном производстве литейные сплавы часто приходится сваривать с заготовками, получаемыми по способу экструдирования. Использовали сплавы ADC1 и А6061-T6 толщиной 4 мм. Результаты, полученные при СТП, сравнивали с аналогичными при аргонодуговой и лазерной сварке. Как видно из рис. 6, СТП обеспечивает лучшие свойства соединений. Предел прочности составляет 80 % прочности А6061-T6. При испытании на изгиб разрушение при СТП происходит по основному металлу. О положительных результатах СТП разнородных сплавов, а также алюминиевых сплавов со сталями сообщается в работе [21]. При СТП стали SS400 и сплава А5083 толщиной 2 мм предел прочности соответствовал 240 МПа, что составляет 86 % прочности алюминиевого сплава.

В качестве недостатка способа СТП авторы работ [2, 12] отмечают образование в конце шва отверстия, равного диаметру наконечника, что требует выведения шва за пределы рабочего сечения заготовки или заполнения отверстия после сварки с помощью других методов таких, как варка трением специальных пробок.

Совершенствование технологии и оборудования позволяет преодолеть существующие недостатки, а также расширить области применения способа. Хотя СТП применяется в основном для стыковых и нахлесточных швов, возможно также получение угловых, тавровых, точечных швов.

Точечную СТП можно реализовать двумя способами. Первый — точечная сварка погружением, запатентованная фирмой «Mazda» (Япония) в 2003 г. При этом вращающийся инструмент погружается в деталь, доводя металл в зоне соединения до пластического состояния и последующего перемешивания его под заплечиком. После этого инструмент поднимается, оставляя ха-

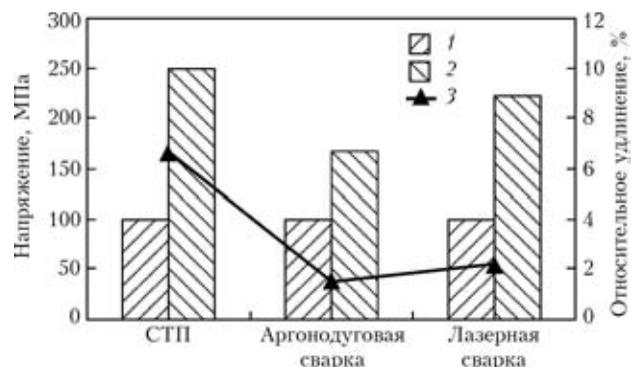


Рис. 6. Механические свойства сварного соединения, выполненного различными способами сварки: 1 — предел текучести; 2 — предел прочности; 3 — относительное удлинение

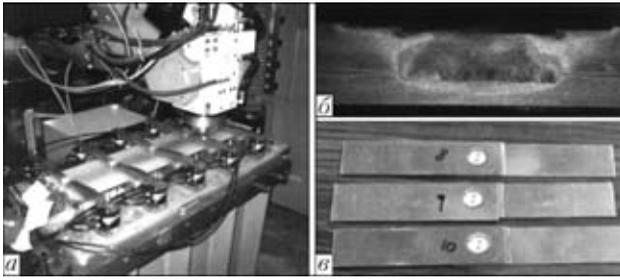


Рис. 7. Установка для точечной СТП (а), поперечное сечение (б) и внешний вид образцов (в)

ракторное углубление в детали. Второй способ — точечная СТП с заполнением шва, запатентованная GKSS в 2002 г. [2]. Для этого способа используют инструмент, у которого наконечник и заплечик имеют отдельные системы привода. Вращающийся инструмент опускается в деталь, при этом наконечник выдавливает и перемещивает находящийся под ним металл, а после его убирают. Металл под заплечиком заполняет углубление, и таким образом получается шов без отверстия (рис. 7).

Сварочный инструмент обычно изготавливается из инструментальных сталей H13 (AISI), SKD 61, SKD 11, SKH 57 (JIS) и нержавеющей мартенситной стали SUS 440C (JIS). При этом возможно использование составных инструментов, у которых наконечник изготовлен из кобальтового сплава MP159, а заплечик — из H13 [22]. Для сварки способом СТП сталей толщиной до 0,5'' MegaStir разработала инструмент из поликристаллического кубического нитрида бора. Его стойкость против разрушения выше и позволяет придать наконечнику форму, необходимую для благоприятного течения металла в зоне сварки (рис. 8). Инструмент по отношению к поверхности детали располагают под небольшим углом 2...3° [16, 23], что позволяет обеспечить наиболее высокие показатели качества.

Инструмент, одновременно выполняющий также роль подкладки соединяемых заготовок, приведен на рис. 9 [24]. В NASA разрабатывается



Рис. 8. Внешний вид инструмента из поликристаллического кубического нитрида бора [2]

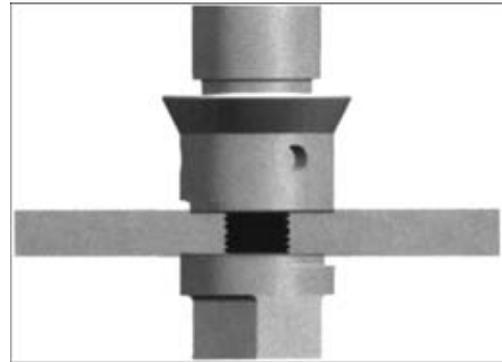


Рис. 9. Конструкция инструмента Bobbin Tool

саморегулирующийся инструмент, длина наконечника которого определяется силами, действующими на него. При отклонении нагрузки на наконечник от заданного значения происходит автоматическая корректировка его длины, что позволяет сваривать заготовки переменного сечения и избегать образования отверстия при выполнении кольцевых швов.

Для сварки алюминиевых сплавов значительной толщины разработаны семейства инструментов Whorl™ (рис. 10) и Triflute™ [25], которые позволяют выполнять сварку за один проход алюминиевых сплавов толщиной 50 мм. Новыми вариантами СТП являются технологии Re-Stir™, Skew-Stir™, Com-Stir™ [26]. Технология Re-Stir™ с переменным вращением инструмента по и против часовой стрелки позволяет исключить асимметрию шва, присущую традиционной СТП. По технологии Skew-Stir™ инструмент немного наклонен по отношению к шпинделю машины таким образом, что точка пересечения осей шпинделя и инструмента, получившая название фокусной, может располагаться над, под или в свариваемой заготовке в зависимости от свойств материала и параметров режима. Такая особенность позволяет получить при вращении инструмента в процессе сварки более широкий шов. Инструменты A-Skew™ и Flare-Triflute™ обеспечивают формирование более прочных нахлесточных соединений. Особенность технологии Com-Stir™ состоит в совмещении в процессе сварки враща-

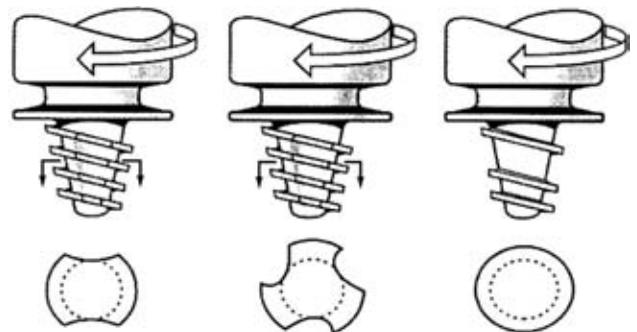


Рис. 10. Схемы вариантов конструкции рабочего инструмента Whorl™



Рис. 11. Соединения, выполненные на автомобиле Mazda RX-8 с помощью точечной СТП [2]

тельного и орбитального движений инструмента. В результате получают более широкие швы, что используется в основном при соединении разнородных материалов. Разработана система с двумя параллельными инструментами Twin-Stir™ [27].

Развитие новых технологий СТП продолжается. В Университете Миссури (Колумбия, США) занимаются разработкой СТП с сопутствующим дополнительным нагревом при пропускании тока через наконечник инструмента. Центр обработки и соединения передовых материалов (США) разрабатывает СТП с индукционным предварительным подогревом материала, что позволит увеличить скорость сварки, уменьшить силы, действующие на инструмент, и уменьшить его износ [2]. В работе [28] изучали возможность использования лазера для предварительного подогрева металла при СТП магниевых сплавов.

Благодаря небольшому количеству факторов, влияющих на процесс СТП, и достаточно простой конструкции оборудования, способ идеально подходит для автоматизации и роботизации [29]. Установка Tricsept 805 позволяет выполнять сварку алюминия толщиной до 10 мм.

СТП уже широко используется при производстве различных высокотехнологичных изделий. Фирмы «General Dynamics Land Systems» и «Edison Welding Institute» провели совместные работы, цель которых — обеспечить требуемые баллистические характеристики соединений броневых плит из алюминиевого сплава 2195-T87 для морских бронированных транспортеров. Сварка плит толщиной 31,8 мм способом СТП вместо аргонодуговой позволила получить приемлемые прочностные свойства соединений и более пластичные (в 2...3 раза) швы. В итоге сварные соединения (в том числе угловые) успешно прошли баллистические испытания [22].

Для предотвращения ухудшения свойств сверхпроводящей ниобий-титановой проволоки ее необходимо соединять с жестким элементом из



Рис. 12. Оборудование для СТП в вертикальном положении

чистого алюминия при температуре ниже 400 °С. Раньше для этого использовали низкотемпературную пайку, но паяные швы имели низкую прочность. СТП обеспечила требуемые свойства сварного соединения в жидком гелии [12].

С 2003 г. компания «Ford Motor Co.» (США) изготовила несколько тысяч автомобилей Ford GT, в которых СТП применена для сварки центрального отсека. В нем располагается изолированный от внутреннего отделения топливный бак [2]. СТП повышает точность размеров и на 30 % увеличивает прочность соединений по сравнению со сходными узлами при дуговой сварке в защитном газе. В работе [30] описан процесс изготовления точечной сваркой трением кузова автомобиля Mazda RX-8 (рис. 11). С 2003 г. было произведено свыше 100 тыс. автомобилей, двери которых выполнены с использованием точечной СТП [7]. Успешное применение данного способа позволяет планировать фирме выполнение подобных соединений на новом поколении автомобилей модели MX-5.

Активно занимаются изучением процесса СТП в аэрокосмической отрасли (рис. 12) [24]. В 2001 г. этот процесс внедрен в производство внешнего бака ракеты-носителя для возвращаемых космических кораблей. Технология предусматривает сварку восьми продольных швов на резервуаре из сплава 2195 для жидкого водорода и четырех продольных швов на резервуаре для жидкого кислорода, что составляет приблизительно 1/2 мили швов на каждом баке. Разрабатывается оборудование для ремонтной СТП в условиях космического вакуума. Концепция применения СТП основана на том, что высокая скорость вращения инструмента (30000 об/мин) позволит уменьшить усилия, необходимые для выполнения сварки.

Компания «Boeing» начала использовать СТП при производстве ракеты «Delta» II и III (рис. 13)

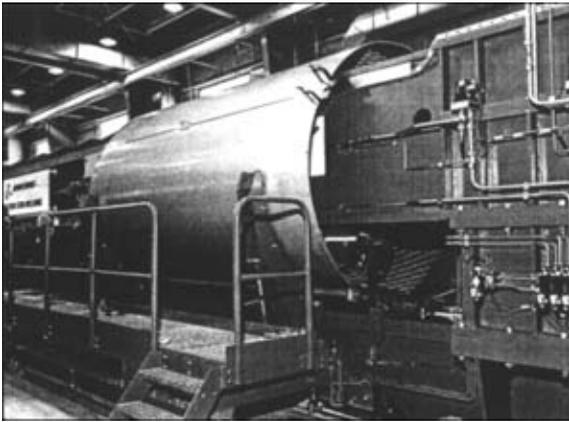


Рис. 13. Установка для STП топливного бака ракеты «Delta» на предприятии «Boeing»



Рис. 14. Самолет «Eclipse 500» с узлами, изготовленными STП



Рис. 15. Внешний вид экспериментальной установки для STП тонколистовых (1,8...2,5 мм) алюминиевых сплавов

[31]. Сварка выполняется на топливном баке длиной 8,4 м, на баке для жидкого кислорода длиной 12 м и на других конструкциях. STП обеспечивает повышение качества (один дефект на 76,2 м шва) по сравнению с аргонодуговой сваркой (один дефект на 8,4 м шва), уменьшается время изго-

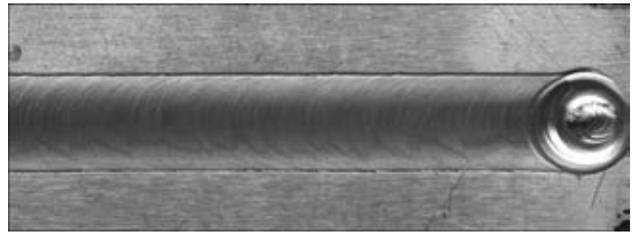


Рис. 16. Внешний вид шва, полученного STП (алюминиевый сплав АМг6 толщиной 2 мм)

**Механические свойства соединений алюминиевых сплавов, полученных STП**

Алюминиевый сплав	$\sigma_B$ , МПа	$\alpha$ , град
АМг6	343	180
1420	362	96
1201	294	180
1460	325	180

товления сварной конструкции. Производство ракет «Delta II» выросло с 8 до 17 ед. в год.

В [32] сообщается о работах по STП оребренных панелей для крыла самолета из сплавов 2024, 7475, 7050 толщиной 4 мм. Высокое качество соединений обеспечено при использовании STП на самолете «Airbus A350» и двух новых версиях A340 (A340-500 и A340-600) [2]. Компания «Eclipse Aviation» завершает сертификацию реактивного самолета бизнес-класса «Eclipse 500» с узлами, изготовленными способом STП (рис. 14).

Таким образом, представленный обзор свидетельствует о том, что STП успешно развивается и находит применение в различных отраслях промышленности. Большинство публикаций касаются сварки алюминиевых сплавов средней и сравнительно большой толщины. Следует отметить, что затруднения обычно возникают при соединении заготовок толщиной 0,5...3 мм, а также более 40 мм. В связи с этим, а также с возникающими осложнениями при обеспечении точности сборки тонкостенных заготовок под сварку в ИЭС им. Е. О. Патона проведены исследования процесса STП на специальной экспериментальной установке (рис. 15). Работы выполнены на алюминиевых сплавах АМг6, 1201, 1460 толщиной 1,8...2,5 мм. На рис. 16 приведен внешний вид сварного соединения сплава АМг6, полученного способом STП. Одновременно проверена эффективность сварочных инструментов с различными профилями рабочей части. Установлено, что соединения при данном способе сварки отличаются высоким уровнем механических свойств (коэффициент прочности сварных соединений составляет 0,7...0,9 % уровня прочности основного металла) (таблица).

1. *Pat. 5460317 US*. Friction stir butt welding / W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham et al. — Publ. 1995.
2. *Arbegas W. J.* Friction stir welding. After a decade of development // *Welding J.* — 2006. — **85**, № 3. — P. 28–35.
3. *Microstructures* and room temperature mechanical properties in friction-stir-welded joints of 7075 aluminum alloys / T. Ito, Y. Motohashi, A. Goloborodko et al. // *J. of the Jap. Weld. Soc.* — 2005. — **74**, № 3. — P. 9–13.
4. *Aritoshi M.* Friction stir welding of magnesium alloys sheets // *Ibid.* — 2005. — **74**, № 3. — P. 18–23.
5. *Nakata K.* Friction stir welding of copper and copper alloys // *Ibid.* — 2005. — **74**, № 3. — P. 14–17.
6. *Klingensmith S., Dupont J.N., Marder A.R.* Microstructural characterization of a double-sided friction stir weld on a super-austenitic stainless steel // *Welding J.* — 2005. — № 5. — P. 77–85.
7. *Martin J.* Pushing the boundaries — friction stir goes deeper than before // *TWI Connect.* — 2006. — Jan./Feb. — P. 1.
8. *Teh N. J.* Small joints make a big difference // *Ibid.* — 2006. — **143**, № 3. — P. 25–29.
9. *Эрикссон Л. Г., Ларссон Р.* Ротационная сварка трением — научные исследования и новые области применения // *Технология машиностроения.* — 2003. — № 6. — P. 81–84.
10. *Effect* of welding parameters on nugget zone microstructure and properties in high strength aluminium alloy friction stir welds / A. A. Hassan, P. B. Prangnell, A. F. Norman et al. // *Sci. Technol. Weld. Joining.* — 2003. — **8**, № 4. — P. 257–268.
11. *Defalco J.* Friction stir welding vs. fusion welding // *Welding J.* — 2006. — **85**, № 3. — P. 42–44.
12. *Okamura H., Aota K., Ezumi M.* Friction stir welding of aluminium alloy and application to structure // *J. of Jap. Institute of Light Metals.* — 2000. — **50**, № 4. — P. 166–172.
13. *Heat* inputs and mechanical properties of friction stir welding / K. Aota, H. Okamura, E. Masakuni et al. // *Proc. of the 3rd Intern. friction stir welding symp., Kobe, Japan, 27–28 Sept., 2001.*
14. *Analysis* of friction stir welds using thermocouple measurements / S. G. Lambrakos, R. W. Fonda, J. O. Milewski et al. // *Sci. Technol. Weld. Joining.* — 2003. — **8**, № 5. — P. 385–390.
15. *Investigation* on residual stresses in friction stir welds / C. Dalle Donne, E. Lima, J. Wegener et al. // *Proc. of the 3rd Intern. friction stir welding symp., Kobe, Japan, 27–28 Sept., 2001.*
16. *Volpone M., Mueller S. M.* Friction stir welding (FSW): le ragione di un successo // *Rivista Italiana della Saldatura.* — 2005. — № 1. — S. 23–30.
17. *Chao Y. P., Wang Y., Miller K. W.* Effect of friction stir welding on dynamical properties of AA 2024-T3 and AA 7075-T7351 // *Welding.* — 2001. — № 8. — P. 196–200.
18. *Ericsson M., Sandstorm R.* Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG // *Intern. J. of Fatigue.* — 2003. — № 25. — P. 1379–1387.
19. *Mechanical* properties of friction stir welded 5083 aluminum alloy at cryogenic temperatures / M. Hayashi, K. Oyama, H. Eguchi et al. // *Proc. of the 3rd Intern. friction stir weld. symp., Kobe, Japan, 27–28 Sept., 2001.*
20. *Nagano Y., Jogan S., Hashimoto T.* Mechanical properties of aluminum die casting joined by FSW // *Ibid.*
21. *Kimapong K., Watanabe T.* Friction stir welding of aluminium alloy to steel // *Welding J.* — 2004. — № 10. — P. 277–282.
22. *Friction* stir welding demonstrated for combat vehicle construction / K. J. Colligan, P. J. Konkol, J. J. Fisher et al. // *Ibid.* — 2003. — № 3. — P. 34–40.
23. *Shibayanagi T., Maeda M.* Characteristics of microstructure and hardness in friction stir welded 7075 aluminum alloy joints // *Trans. JWRI.* — 2004. — **33**, № 1. — P. 17–23.
24. *Friction* stir welding flies high at NASA / J. Ding, R. Carter, K. Lawless et al. // *Ibid.* — 2006. — № 3. — P. 54–59.
25. *Dolby R. E., Johnson K. J., Thomas W. M.* The joining of aluminium extrusions // *La Metallurgia Italiana.* — 2004. — № 3. — S. 25–30.
26. *Pekkari B.* The future of welding and joining // *Svetsaren.* — 2004. — № 1. — P. 53–59.
27. *Thomas W., Staines D.* Better joints using two contra — rotating FSW tools // *TWI Connect.* — 2006. — May/June. — P. 7.
28. *Laser* — assisted friction stir welding / G. Kohn, Y. Greenberg, I. Makover et al. // *Welding J.* — 2002. — № 2. — P. 46–48.
29. *Controlling* robotic friction stir welding / G. E. Cook, H. B. Smartt, J. E. Mitchell et al. // *Ibid.* — 2003. — № 6. — P. 28–34.
30. *Kato K., Sakano R.* Development of spot friction welding and application for automobile body // *J. of Light Metal Welding & Construction.* — 2004. — **42**, № 11. — P. 8–13.
31. *Imuta M., Kamimuki K.* Development and application of friction stir welding for aerospace industry // *Proc. of the IIW Intern. conference on technical trends and future prospectives of welding technology for transportation, land, sea, air and space, Osaka, Japan, 15–16 July, 2004.* — P. 53–64.
32. *Kumagai M.* Application of FSW for aircraft // *Welding Technology.* — 2003. — **51**, № 5. — P. 74–78.

The main directions of investigations conducted at the E.O.Paton Electric Welding Institute over half a century in the field of arc welding of aluminium alloys are outlined. Examples of an effective application of technologies of arc welding of aluminium alloys in fabrication of various structures are given.

Поступила в редакцию 05.04.2007

# ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКОЙ ПОСЛЕ РЕМОНТНОЙ СВАРКИ

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

Для повышения ресурса металлоконструкций при ремонте с использованием сварки по стандартной технологии рекомендуется зону сплавления ремонтных швов с основным металлом обрабатывать высокочастотной механической проковкой (ВМП). После упрочнения ВМП сварных соединений стали 09Г2С в исходном состоянии, а также после ремонта с использованием сварки их циклическая долговечность при одночастотном отнулевом осевом растяжении повышается в 3...5 раз.

*Ключевые слова:* ремонт сваркой, сварные соединения, сталь, высокочастотная механическая проковка, повышение ресурса

В процессе создания сварных металлоконструкций, работающих в условиях переменного нагружения, используются различные конструктивно-технологические способы повышения циклической долговечности соединений [1–3]. Однако после определенного периода эксплуатации иногда до исчерпания назначенного при проектировании срока службы в сварных соединениях элементов конструкций возникают усталостные трещины. Замена поврежденных конструкций новыми требует значительных материальных затрат и времени, поэтому в отдельных случаях их эксплуатация временно, до выполнения ремонта, продолжается и после появления в них усталостных трещин. При этом для увеличения долговечности используют известные способы торможения усталостных трещин, а также дополнительные упрочняющие технологии. Как правило, они основаны на снятии растягивающих или искусственном наведении благоприятных сжимающих остаточных напряжений вблизи вершин развивающихся трещин местным нагревом, взрывной или ударной обработками, засверливанием отверстий в вершинах трещин и установкой в отверстия с затяжкой высокопрочных болтов [3–6]. Более эффективного восстановления несущей способности соединений с усталостными трещинами можно достичь полным удалением поврежденного металла с трещиной и последующим выполнением ремонта с использованием дуговой сварки. Однако и в этом случае для существенного повышения циклической долговечности соединений с использованием традиционных сварочных технологий и материалов следует различными способами снижать концентрацию напряжений в

зонах перехода швов к основному металлу, снимать или перераспределять растягивающие и создавать благоприятные сжимающие остаточные напряжения в ремонтных швах или прилегающих к ним ЗТВ. Полного или частичного снятия остаточных напряжений можно добиться соответствующей термической обработкой всего элемента или отдельных его зон [7]. Создание сжимающих остаточных напряжений в сварных соединениях представляется возможным в процессе их изготовления или ремонта сваркой, при использовании в качестве сварочной проволоки материала с аустенитно-мартенситной структурой. Для этих целей можно применять проволоку с содержанием в основе, мас. %: 10 Cr, 10 Ni и 80 Fe [8]. При остывании такого металла шва или наружного (облицовочного) слоя на последней стадии охлаждения происходит превращение кристаллической структуры аустенита в мартенсит, в результате чего увеличивается объем металла и возникают остаточные напряжения сжатия [9]. При сварке традиционными материалами остаточные напряжения сжатия в зоне сварного соединения могут наводиться искусственно после изготовления или ремонта сваркой путем общего или местного поверхностного пластического деформирования в результате статической перегрузки, взрывной или ударной обработок [10, 11]. Могут применяться и комбинированные способы упрочнения, способствующие в наибольшей мере повышению ресурса металлоконструкций.

Одним из наиболее эффективных, производственных и экономичных способов повышения циклической долговечности соединений в результате поверхностного пластического деформирования металла шва или зоны перехода сварного шва к основному металлу является высокочастотная механическая проковка (ВМП) с использованием ультразвуковых преобразователей [12–15]. Для оценки эффективности такой обработки, нап-



равленной на повышение циклической долговечности соединений после ремонта сваркой, были проведены усталостные испытания крупномасштабных образцов крестообразной формы (рис. 1), изготовленных из низколегированной стали 09Г2С. Такие образцы имеют высокие значения коэффициента концентрации напряжений и уровня растягивающих остаточных напряжений в исходном состоянии, соизмеримые с их значениями в реальных сварных металлоконструкциях. Сварные швы продольных ребер образцов были выполнены ручной дуговой сваркой штучными электродами УОНИ-13/55 с полным проваром. После сварки образцов на длине 70 мм от края ребра с одной стороны от оси  $OO'$  зоны перехода швов к основному металлу были обработаны ВМП. Такая конструкция образцов позволила определять сопротивление усталости сварных соединений в исходном состоянии, упрочненных технологией ВМП в состоянии после сварки, а также после их ремонтов сваркой без упрочнения и с упрочнением ВМП на одних и тех же образцах и режимах нагружения.

Усталостные испытания образцов выполняли при мягком режиме отнулевого осевого растяжения на сервогидравлической машине УРС 200/20 с частотой нагружения 5 Гц. Критерием завершения испытаний принимали развивающуюся усталостную трещину на поверхности образца длиной 20 мм. В процессе испытаний усталостные трещины, как правило, зарождались по линии сплавления лобового шва с основным металлом. Первыми зарождались трещины в неупрочненных сварных соединениях. При достижении трещиной критической длины испытания прерывали, металл с трещиной усталости удаляли пальцевой фрезой и заваривали образовавшееся углубление электродами УОНИ-13/55. После ремонта испытания образцов продолжали на первоначально заданных режимах нагружения до образования усталостных трещин критических размеров в отремонтированных или исходно упрочненных технологией ВМП соединениях. Вновь образовавшиеся трещины повторно ремонтировали сваркой. Часть образцов

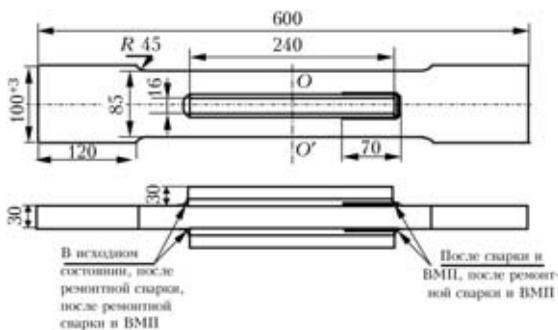


Рис. 1. Размеры образца для оценки эффективности применения ВМП изготовленных и отремонтированных сварных соединений

испытывали на первоначально заданных режимах нагружения до образования усталостных трещин в исходном после ремонта состоянии, а часть — после дополнительного упрочнения ремонтных швов технологией ВМП.

Полученные в работе результаты усталостных испытаний приведены на рис. 2 и 3. Оценка эффективности применения ремонтов для увеличения циклической долговечности сварных соединений представлена на рис. 4 коэффициентом повышения долговечности  $K_{п.д}$  в виде отношения

$$K_{п.д} = N_y / N_{и},$$

где  $N_y$  — циклическая долговечность соединения на определенном уровне напряжений после упрочнения ВМП в исходном состоянии, после ремонта сваркой, после ремонта сваркой с применением ВМП упрочненных и неупрочненных в исходном состоянии соединений;  $N_{и}$  — циклическая долговечность соединения на том же уровне напряжений в исходном состоянии после сварки.

Поскольку кривые усталости исследованных сварных соединений упрочненных и неупрочненных в исходном состоянии, а также после их ремонтов сваркой с применением технологии ВМП и без ее применения располагаются практически параллельно (рис. 2 и 3), то  $K_{п.д}$  для каждого конкретного соединения на всех уровнях напряжений одинаков. Сопоставление установленных значений  $K_{п.д}$  показывает (рис. 4), что после первого и второго ремонтов сваркой циклическая долговечность неупрочненных образцов практически восстанавливается до исходного уровня. После третьей ремонтной сварки циклическая долговечность достигает примерно 74 % исходной. Дополнительная ВМП сварных соединений повышает циклическую долговечность образцов после первого ремонтного сваривания в 4,6 раза, а после второго и третьего — соответственно в 3,9 и 3,6 раза. ВМП сварных соединений в состоянии после

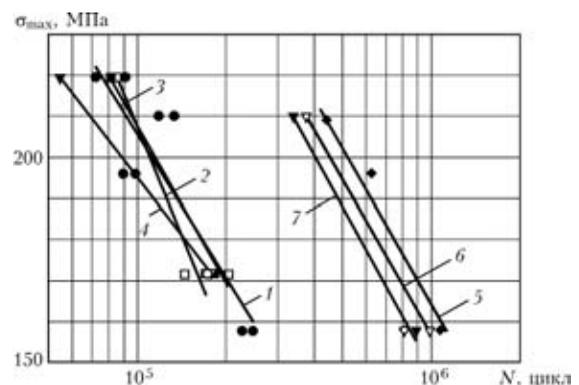


Рис. 2. Кривые усталости сварных соединений стали 09Г2С с двумя продольными ребрами без упрочнения: 1 — исходное состояние; 2–4 — соответственно первый, второй и третий ремонт сваркой; 5–7 — соответственно первый, второй, третий ремонт сваркой с последующей обработкой ВМП

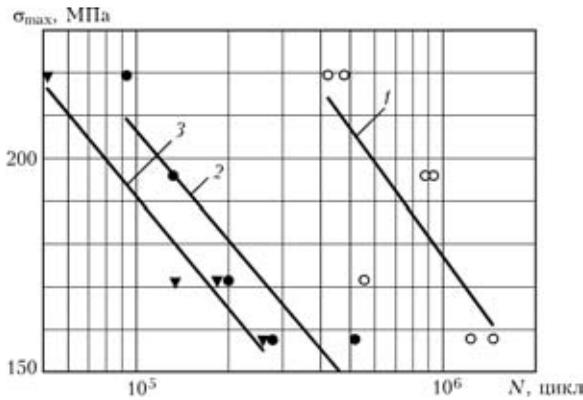


Рис. 3. Кривые усталости сварных соединений стали 09Г2С с продольными ребрами, упрочненных технологией ВМП в исходном состоянии: 1 — сварка и проковка; 2, 3 — соответственно первый и второй ремонт сваркой с последующей обработкой ВМП

сварки повысила циклическую долговечность образцов почти в 5 раз.

После первого и второго ремонтов сваркой с последующей обработкой ремонтных швов технологией ВМП соединений, упрочненных проковкой в состоянии после сварки, циклическая долговечность составила около 95 и 63 % долговечности образцов в исходном состоянии. Следовательно, эффективность применения технологии ВМП после ремонта сваркой поврежденных усталостными трещинами исходно неупрочненных ВМП соединений данного типа выше, чем соединений, упрочненных проковкой в исходном состоянии. Такая закономерность может быть связана с существенно большим количеством циклов накопления усталостных повреждений в объеме металла вблизи окончания продольного ребра при более высокой концентрации напряжений в условиях двухосного растяжения в упрочненных соединениях по сравнению с неупрочненными. Указанное различие количества циклов связано с тем, что в неупрочненных после изготовления сварных соединениях исследуемого типа усталостные трещины зарождаются при долговечностях, примерно в 5 раз меньших, чем в соединениях, упрочненных ВМП в состоянии после сварки. Условия двухосного растяжения на некотором удалении от лобового шва в исходно упрочненных соединениях обусловлены появлением там реактивных растягивающих напряжений, уравновешивающих остаточные напряжения сжатия в пластически деформированном металле околшововой зоны после его наклепа, которые ориентированы перпендикулярно направлению приложенного переменного нагружения. При этом особенности ремонтов сваркой соединений данного типа таковы, что после удаления материала с трещиной и заварки образовавшейся полости зона перехода ремонтных швов к основному металлу (место образования усталостной трещины) в каждом ремонте перемещается дальше от места окончания

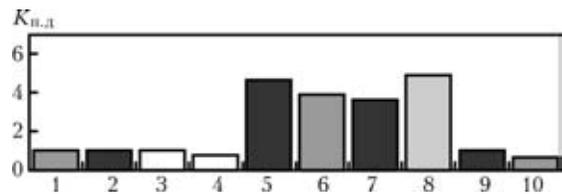


Рис. 4. Коэффициенты повышения долговечности  $K_{п.д.}$  сварных соединений стали 09Г2С: 1 — исходное состояние; 2–4 — соответственно первый, второй и третий ремонт сваркой; 5–7 — соответственно первый, второй и третий ремонт сваркой и проковка неупрочненных соединений; 8 — сварка и проковка соединений в исходном состоянии; 9, 10 — соответственно первый и второй ремонт сваркой и проковка упрочненных соединений

продольного ребра на ширину ремонтного шва в зону меньшей концентрации напряжений. Что касается оптимального количества ремонтов сваркой исследуемого типа сварного соединения, то необходимо отметить, что уже после второго ремонта с последующей проковкой ремонтных швов как для упрочненных, так и для неупрочненных в состоянии после сварки соединений их основной материал исчерпывает несущую способность и усталостные разрушения возникают вдали или непосредственно в ранее наложенных швах соединений. В этой связи выполнять ремонтную сварку с упрочняющей обработкой более двух раз на одном соединении нецелесообразно.

### Выводы

1. Первый и второй ремонты сваркой поврежденных усталостными трещинами неупрочненных соединений практически восстанавливают их циклическую долговечность до уровня исходного состояния, а уже после третьего ремонта долговечность не превышает 75 % исходного значения.
2. Дополнительная ВМП зон перехода ремонтных швов к основному металлу повышает циклическую долговечность соединений после первой ремонтной сварки не менее чем в 4 раза, а после второй и третьей не менее чем в 3 раза по сравнению с долговечностью соединений в исходном состоянии.
3. ВМП сварных соединений в состоянии после сварки повышает циклическую долговечность упрочненных соединений в 5 раз по сравнению с их исходным состоянием.
4. Ремонтную сварку с упрочняющей обработкой технологией ВМП целесообразно выполнять не более двух раз на одном сварном соединении из-за исчерпания несущей способности основного материала и ранее выполненных швов вследствие достижения ими ограниченных пределов выносливости.

1. Патон Б. Е., Труфяков В. И. О повышении несущей способности и долговечности сварных конструкций // Автомат. сварка. — 1982. — № 2. — С. 1–6.

2. Труфяков В. И. Повышение сопротивления усталости сварных соединений и конструкций // Там же. — 1998. — № 11. — С. 11–19.
3. Патон Б. Е. Современные направления повышения прочности и ресурса сварных конструкций // Там же. — 2000. — № 9/10. — С. 3–9.
4. Указания по осмотру и усилению эксплуатируемых сварных пролетных строений. Мин-во путей сообщения. Главное управление путей. НИИ мостов ЛИИЖТа. — М., 1990. — 28 с.
5. Кныш В. В. Определение циклической долговечности элементов конструкций при торможении усталостных трещин // Автомат. сварка. — 2000. — № 9/10. — С. 73–75.
6. Исследование эффективности торможения усталостных трещин полем остаточных напряжений сжатия / В. А. Бродовой, П. П. Михеев, В. В. Кныш и др. // Там же. — 2003. — № 8. — С. 50–51.
7. Винокуров В. А. Отпуск сварных конструкций для снижения напряжений. — М.: Машиностроение, 1973. — 213 с.
8. Ohta A., Suzuki N, Maeda Y. Effective means for improving the fatigue strength of welded structures // Welding World. — 1996. — 37. — Р. 84–89.
9. Способ повышения циклической долговечности и ресурса сварных стальных конструкций / В. С. Ковальчук, В. В. Кныш, В. Д. Позняков, С. Б. Касаткин // Автомат. сварка. — 2007. — № 3. — С. 44–47.
10. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. — Киев: Наук. думка, 1973. — 216 с.
11. Труфяков В. И., Михеев П. П., Кудинов В. М. Повышение сопротивления усталости взрывным нагружением // Автомат. сварка. — 1984. — № 12. — С. 50–52.
12. Михеев П. П. Повышение сопротивления усталости сварных соединений конструкций ультразвуковой ударной обработкой // Проблемы сварки и специальной электрометаллургии: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 41–47.
13. Кныш В. В., Кузьменко А. З. Повышение сопротивления усталости сварных соединений высокочастотной механической проковкой // Сварщик. — 2005. — № 2. — С. 19–21.
14. Кныш В. В., Кузьменко А. З., Войтенко О. В. Повышение сопротивления усталости сварных соединений высокочастотной механической проковкой // Автомат. сварка. — 2006. — № 1. — С. 43–47.
15. Лобанов Л. М., Кир'ян В. І., Кныш В. В. Підвищення ресурсу сварних металоконструкцій високочастотною механічною проковкою // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2006. — № 1. — С. 56–61.

To extend the life of metal structures in repair welding using the standard technology, it is recommended to treat the fusion zone between the repair weld and base metal by high-frequency mechanical peening (HFMP). Strengthening of the welded joints on steel 09G2S in the as-welded condition and after repair welding by the HFMP method provides a 3-5 times increase of their service life in fixed-frequency zero-to-tension stress cycle.

Поступила в редакцию 30.03.2007



22–23 ноября 2007 г., Подмоскowie  
(Солнечногорский район, отель Foresta Tropicana)

## МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СВАРОЧНЫЕ И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ, РЕКОНСТРУКЦИИ И РЕМОНТЕ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ»

**Организаторы:** Журнал «Территория НЕФТЕГАЗ» РГУ нефти и газа им. Губина  
**С участием:** ВНИИГАЗ, ВНИИСТ

### Программа конференции

- ✓ *Состояние и перспективные направления развития сварочных и родственных технологий.*
- ✓ *Современные сварочные материалы, оборудование и технологии.*
- ✓ *Врезка отводов, перемычек, лупингов при ремонте газонефтепроводов под давлением.*
- ✓ *Ремонт дефектных участков труб и сварных соединений сваркой, наплавкой, заваркой, вваркой «заплат», приваркой патрубков, вантузов, стальными сварными муфтами газонефтепроводов.*
- ✓ *Современные технологии сварки при строительстве морских газонефтепроводов и ремонте находящихся в эксплуатации подводных переходов через реки.*
- ✓ *Современные материалы, оборудование и методы неразрушающего контроля сварных соединений.*
- ✓ *Современное оборудование и методы размагничивания конструктивных элементов сварных соединений газонефтепроводов.*
- ✓ *Оценка неразрушающими методами контроля напряженно-деформированного состояния отремонтированных газонефтепроводов.*
- ✓ *Методы снижения остаточных сварочных напряжений с применением термических и альтернативных технологий.*
- ✓ *Перспективные методы защиты от наружной и внутренней коррозии сварных швов газонефтепроводов.*
- ✓ *Современные методы диагностики для выявления потенциально опасных участков газонефтепроводов.*
- ✓ *Жизнеобеспечение при проведении сварочных работ.*
- ✓ *Нормативная база по сварке, родственным технологиям и неразрушающему контролю.*

Сазонова Наталья +7(495) 787-85-29; natasha@neftegas.info

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ КСУ КС 02

П. М. РУДЕНКО, В. С. ГАВРИШ, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены методы контроля качества контактной точечной сварки в реальном времени. Предложена универсальная система управления и контроля, отличительными признаками которой являются широкие возможности по контролю качества в реальном времени. Приведены технические характеристики системы и показаны области ее применения в промышленности.

*Ключевые слова:* контактная точечная сварка, система управления, контроль качества, нечеткая логика, нейронные сети

Современные системы управления процессом контактной точечной сварки реализуются на основе мощных однокристалльных микроконтроллеров, функциональные способности и производительность которых позволяют реализовывать (кроме функций прямого цифрового управления сварочной машиной) сложные алгоритмы контроля качества сварного соединения и управления процессом. В настоящее время, учитывая невозможность визуальной оценки размеров сварной точки в процессе ее выполнения, а также современные требования производства по сертификации и обеспечению высокого качества выпускаемой продукции, контроль качества контактной точечной сварки в реальном времени является одним из основных требований к системе управления точечной сварочной машиной.

Как правило, алгоритмы контроля качества сварных точек основаны на измерении и использовании параметров процесса: сварочного тока, напряжения между электродами, сопротивления участка электрод — электрод, усилия сжатия электродов.

Можно выделить несколько методов контроля по параметрам процесса. Простейший осуществляется по допустимым отклонениям, например, сварочного тока и напряжения между электродами. В дальнейшем этот метод получил развитие благодаря использованию алгоритмов нечеткой логики, которые дали возможность повысить надежность контроля [1].

Для количественной оценки качества сварного соединения, например, диаметра ядра сварной точки, использовали метод оценки по регрессионным моделям. Последние (обычно в виде полиномов первого или второго порядка) строятся по экспериментальным данным сварки методом математической статистики. При этом в опытах пы-

таются учесть все возмущения, которые действуют на процесс в производственных условиях. Для повышения точности моделей применяют различные алгоритмы подстройки коэффициентов модели по данным экспериментальной проверки режима непосредственно на производстве.

Метод контроля по математическим моделям получил дальнейшее развитие с появлением нейронных сетей [2]. Применение моделей на основе нейронных сетей математически сложнее, чем применение регрессионных моделей, однако в первом случае удается повысить точность и надежность прогнозирования качества контактной сварки за счет того, что в нейронной сети возможно проанализировать динамические параметры процесса — изменение сварочного тока и напряжения между электродами во время сварки, что характеризует изменение сопротивления на свариваемом участке и точнее отражает процесс точечной сварки.

Каждый из перечисленных методов — от самого простого до сложного — имеет свои преимущества и недостатки, и в зависимости от назначения системы управления может быть применен на практике. Возможность включения по требованию заказчика в состав программного обеспечения системы и применение перечисленных методов контроля качества контактной точечной сварки является основным отличительным признаком системы управления машиной для контактной точечной сварки КСУ КС 02, разработанной специалистами ИЭС им. Е. О. Патона совместно с Инженерным центром «Сварка давлением» НТК ИЭС им. Е. О. Патона, по сравнению с известными регуляторами серии РКС, которые выпускаются в настоящее время в Украине (завод «Сэлма», г. Симферополь) и серии РКМ, выпускаемый в России (завод «Электрик», г. С.-Петербург). Система предназначена для управления циклом сварки и контроля процесса применительно к стационарным и подвесным одно- и двухпостовым машинам переменного тока.



Система управления машиной для контактной точечной сварки КСУ КС 02 выполняет следующие функции:

прямое цифровое управление сварочной машиной (управление тиристорным контактором и четырьмя (две пары) электропневматическими клапанами для задания и выполнения циклограммы режима сварки: предварительное сжатие, сжатие, сварка с модуляцией тока, охлаждение, отжиг с модуляцией тока, ковка с возможностью включения во время прохождения тока, пауза);

стабилизация параметров процесса сварки (компенсация изменения напряжения питающей сети, стабилизация действующего значения сварочного тока, автоматическая настройка на  $\cos \varphi$  сварочной машины, автоматическая корректировка сварочного тока при износе рабочей поверхности электродов);

контроль качества сварки (по допустимым отклонениям сварочного тока и напряжения между электродами или прогнозирование диаметра ядра сварной точки по математической модели);

вспомогательные функции (хранение в памяти системы восьми заданных режимов сварки при отключении напряжения питания и автоматический выбор любого из них внешним сигналом управления, самодиагностика системы, связь с персональным компьютером через канал последовательного обмена RS 232 или RS485, программная защита от несанкционированного доступа к заданию параметров режима сварки, защита выходных цепей управления электропневмоклапанами, тиристорным контактором и вспомогательным оборудованием от перегрузок).

Система имеет удобную панель управления с мембранной клавиатурой и жидкокристаллическим дисплеем, что обеспечивает простоту и наглядность сложной циклограммы процесса сварки (рисунок).

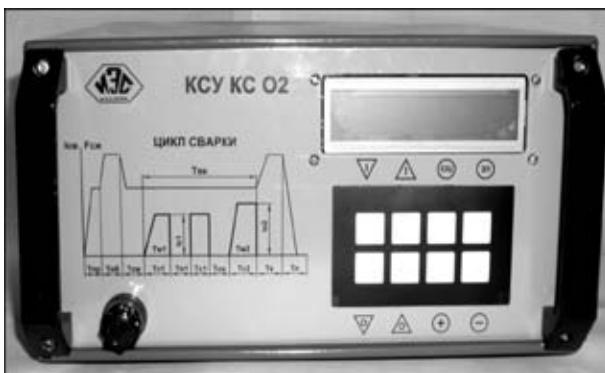
В простейшем случае контроль качества осуществляется по допустимым отклонениям параметров процесса. В контроллер заносятся оптимальные значения сварочного тока и напряжения между электродами, а также диапазон допусти-

мых отклонений этих параметров в процентах. Система формирует сообщение о выходе из допусков по любому из параметров.

Как разновидность контроля по допускам возможен контроль на основе алгоритмов нечеткой логики, который был реализован при сварке межэлементных соединений аккумуляторов [1]. Из-за сложности оценки качества сварного соединения в этом случае количественная оценка какого-либо из показателей соединения недостаточна, а обычный допусковый контроль не позволяет использовать получаемые данные для управления процессом, который учитывал бы технологические особенности сварки деталей из свинца. В используемом алгоритме по напряжению между электродами контролируют величину отпечатка от электродов, и далее для регулирования плотности тока определяют требуемое значение сварочного тока, которое необходимо получить при его стабилизации.

В случаях, когда качество сварного соединения можно определять по какому-либо расчетному параметру, например, диаметру ядра или глубине проплавления, используется математическая модель в виде уравнения регрессии или нейронной сети. Хотя эти способы контроля качества сварных соединений являются почти равноценными, для некоторых свариваемых материалов, в частности, сталей, покрытых защитным слоем, нейронные сети позволяют достичь более высокую точность прогнозирования, так как с их помощью удастся проследить изменения параметров во времени. Известно, что поведение кривой сопротивления в процессе сварки низкоуглеродистых сталей хорошо коррелируется с показателем прочности сварного соединения.

Чтобы исключить хранение в памяти больших массивов данных по весовым коэффициентам для разных толщин и материалов, в системе используется адаптивный алгоритм контроля качества. Он заключается в том, что входными параметрами сети являются их значения, выраженные в относительных единицах к оптимальным значениям. При таком представлении нейросети переход от одного оптимального режима сварки к другому, например, при сварке деталей разной толщины или материалов для перестройки сети, необходимо задать параметры нового оптимального режима. Подстройка коэффициентов по экспериментальным данным необходима в редких случаях. Однако количество требуемых дополнительных экспериментов существенно меньше, чем при построении нейросети в традиционном виде [2]. При этом достигается требуемая точность оценки диаметра ядра. Данные о диаметре ядра сварной точки можно передавать через последовательный канал в персональный компьютер для формирования протокола о качестве сварки конструкции.



Внешний вид КСУ КС 02

Функции контроля качества по регрессионной модели или нейронной сети по требованию заказчика выполняются для конкретного материала и толщины.

Что касается функций управления процессом, то по сравнению с упомянутыми выше РКС и РКМ описываемая система имеет те же возможности, т. е. в зависимости от заданного алгоритма управления КСУ КС 02 осуществляет компенсацию колебания напряжения сети или стабилизацию сварочного тока или напряжения между электродами, а также компенсацию износа электродов. Однако, как и в случае с контролем качества, по требованию заказчика для компенсации износа электродов в КСУ КС 02 возможно использование нескольких алгоритмов: от простейшего, когда сварочный ток увеличивают через заданное количество сварных точек, так и более сложного и точного. Известно, что износ электродов зависит от режима сварки, интенсивности охлаждения, материала электродов, способа их изготовления, свойств свариваемых материалов, покрытия их поверхности и некоторых других причин. Измерить степень износа электродов в процессе сварки довольно затруднительно и его оценка по количеству сварных точек является достаточно грубой. В КСУ КС 02 возможно установить программное обеспечение для реализации алгоритма, основанного на контроле параметров режима сварки в реальном времени и изменении сварочного тока по определенному закону, когда корректирующее воздействие рассчитывается по измеренным данным тока и падения напряжения между электродами с учетом плотности тока в свариваемом контакте [3].

Кроме гибкого построения программного обеспечения, КСУ КС 02 является достаточно универсальной. Известно, что для контактной точечной сварки применяют различные типы сварочных машин, которые требуют разное количество управляющих сигналов. Так, для машин переменного тока требуется как минимум три дискретных управляющих выхода, для машин постоянного тока — пять. Для шовных машин необходимо иметь еще один управляющий выход.

Кроме того, на заводах сварочный пост может включать две-три сварочные машины, а также требуется включение сигнализации по результату сварки или управления вспомогательными механизмами. КСУ КС 02 имеет семь дискретных входов (24 В, 10 мА), восемь дискретных выходов (24 В, 5 А) и два аналоговых выхода, не считая внутренний канал измерения напряжения питающей сети. Все перечисленные входы и выходы гальванически разделены и при модернизации программного обеспечения КСУ КС 02 могут быть использованы произвольно. Таким образом, применение КСУ КС 02 возможно для контактных точечных машин, которые требуют обработки специальных алгоритмов управления. Наиболее эффективно применение КСУ КС 02 при производстве конструкций ответственного назначения и сертификации сварочного производства.

### Выводы

1. Основным отличительным преимуществом КСУ КС 02 по сравнению с известными аналогами являются широкие возможности по контролю качества сварки в реальном времени: контроль по допустимым отклонениям, по статистическим моделям или нейронным сетям с учетом напряжения на электродах. С ее помощью можно решать сложные технологические задачи и тем самым расширить область применения контактной точечной сварки.

2. Система управления является универсальной и может быть применена для различных типов машин для контактной сварки и сварочного производства, например, в автомобиле-, сельхозмашино-, приборо-, авиастроении и т. п.

1. *Контроль качества контактной точечной сварки межэлементных соединений аккумуляторов на основе нечеткой логики / Н. В. Подола, П. М. Руденко, Н. П. Горун, В. М. Ягнятинский // Автомат. сварка. — 1999. — № 5. — С. 42–45.*
2. *Подола Н. В., Руденко П. М., Гавриш В. С. Применение адаптивного алгоритма для контроля качества сварки в системах управления контактными точечными машинами // Там же. — 2004. — № 6. — С. 15–18.*
3. *Подола Н. В., Руденко П. М., Гавриш В. С. Алгоритмы компенсации износа электродов при контактной точечной сварке // Там же. — 2005. — № 4. — С. 18–23.*

Methods for real-time monitoring of quality of resistance spot welding are considered. The control and monitoring system based on the use of the above methods is described. Technical characteristics of the system are presented, and fields of its commercial application are given.

Поступила в редакцию 05.03.2007



## СВАРОЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НОВОГО ФЛЮСА МАРКИ АН-47ДП

**А. В. ЗАЛЕВСКИЙ, В. И. ГАЛИНИЧ**, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)  
**Н. Я. ОСИПОВ, В. И. НЕТЯГА, О. П. КИРИЧЕНКО**, инженеры  
(ОАО «Запорож. з-д сварочных флюсов и стеклоизделий»)\*

Изложены результаты испытаний нового плавяного флюса, предназначенного для сварки высокопрочных низколегированных сталей. Флюс, изготовленный по методу двойного рафинирования и получивший марку АН-47ДП, разрабатывался в рамках инновационного проекта Технопарка «ИЭС им. Е. О. Патона».

*Ключевые слова:* дуговая сварка, низколегированные стали, пемзвидный плавяный флюс, формирование металла шва, отделимость шлаковой корки, узкая разделка, ударная вязкость, производство, двойное рафинирование

Непременным условием успешной работы предприятия в рыночной экономике является постоянное обновление продукции. В рамках инновационного проекта Технопарка Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины совместно с ОАО «Запорожский завод сварочных флюсов и стеклоизделий» разработан новый плавяный флюс марки АН-47ДП и технология его промышленного производства. Новый флюс, являющийся усовершенствованным вариантом флюса марки АН-47, широко используемого для сварки низколегированных сталей повышенной прочности [1], предназначен для качественного формирования металла швов в специфических условиях сварки — в узкую разделку, при высоких скоростях, угловых соединений и обеспечения стой-

кости металла швов против хрупкого разрушения, оцениваемой по энергии удара 47 Дж при  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и 27 Дж при  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  в соответствии с требованиями ISO 14171 [2].

Ниже приведены результаты испытаний свойств флюса АН-47ДП применительно к сварке толстолистового низколегированного проката, где наряду с ударной вязкостью металла швов особо важное значение имеет отделимость шлаковой корки. Для испытаний использовали технологию многослойной однодуговой сварки и сварочные проволоки марок ИМТ 9, ИМТ 6 и ИМТ 9Si диаметром 4 мм, предложенные польской фирмой «Multimet». Эти проволоки по классификации ISO 14171:2000 ([2], табл. 5А) соответствуют маркам S2, S2Mo, S2Si. Для сравнения использовали также отечественную сварочную проволоку марки Св-08Г2С диаметром 3 мм, соответствующую по этому стандарту марке SU31 ([2], табл. 5В). Химические составы проволок, основного металла

**Таблица 1. Химические составы основного металла, сварочных проволок и металла швов, мас. %**

Марка материалов	C	Si	Mn	S	P	Mo
Сталь 09Г2С (данные сертификата качества)	0,12	0,56	1,30	0,021	0,018	—
Проволока (данные сертификата качества)						
ИМТ 9 (S2)	0,01	0,07	1,00	0,015	0,017	—
ИМТ 6 (S2Mo)	0,09	0,13	1,02	0,022	0,008	0,477
ИМТ 9Si (S2Si)	0,09	0,20	0,98	0,010	0,011	—
Св-08Г2С	0,06	0,87	1,88	0,017	0,023	—
Металл швов (при сварке проволокой)						
ИМТ 9	0,059	0,316	1,30	0,025	0,017	—
ИМТ 6	0,051	0,378	1,37	0,031	0,012	0,350
ИМТ 9Si	0,053	0,430	1,38	0,022	0,013	—
Св-08Г2С	0,057	0,932	2,01	0,025	0,024	—
Основной металл сталь 09Г2С	0,110	0,604	1,45	0,019	0,021	—

\* В работе принимал участие инж. Р. Н. Баранник.

(сталь 09Г2С толщиной 40 мм) и металла швов представлены в табл. 1.

Особенностями технологии сварки являлись скос кромок под  $20^\circ$  и подварка корня шва с использованием проволоки Св-08Г2С в смеси аргона (82 %) и углекислого газа (18 %), при этом ширина технологического шва составляла около 4 мм. Как показали результаты предварительных экспериментов с использованием высококремнистых марганцевых флюсов марок АН-348-А и АН-60, такая технология сварки отрицательно повлияла на отделимость шлаковой корки из узкой разделки. Поэтому нами были проведены специальные исследования по отделимости шлаковой корки флюса АН-47ДП из узкой разделки.

Испытывали флюс промышленного производства, показатели качества которого соответствовали ТУ У 05416923.049–99 и ГОСТ Р 52222. Перед сваркой его просушивали при температуре  $300^\circ\text{C}$  в течение трех часов при толщине слоя флюса в противне 30...40 мм. Качество сушки флюса контролировали по количеству и размерам пор в шлаковой корке, полученной при наплавке валика на зачищенную поверхность пластины при напряжении дуги 43 В (согласно рекомендации ТУ У 05416923.049–99). Контроль пор в шлаковой корке не выявил.

Как известно, отделимость шлаковой корки флюса при сварке не является стандартизированным показателем его качества, поэтому отсутствует и единая методика ее оценки. Однако плохая отделимость корки увеличивает затраты ручного труда, времени и материалов при изготовлении сварной конструкции. Поэтому при выборе флюса для сварки в разделку отделимость шлака оценивают, как правило, только качественно в каждом конкретном случае сварки. Так, принято считать, что флюс имеет хорошую отделимость, если на простроганной поверхности стальной пластины корка отделяется от поверхности металла шва самопроизвольно, без применения каких-либо инструментов (молотка, зубила и т. п.). Почти все существующие флюсы отличаются такой способностью при сварке нелегированных или низколегированных сталей, поскольку такие флюсы обеспечивают хорошую стабильность дугового процесса и не содержат в своем составе компонентов, способных образовывать на поверхности контакта шлака с металлом химические соединения с кристаллической решеткой последнего. Кроме того, на отделение шлака благоприятно влияет отсутствие ограничений для растекания шлака по поверхности жидкого металла сварочной ванны. Однако при сварке стыков с глубокой разделкой, характерных для конструкций из толстолистового проката, ситуация существенно ухудшается — корка с первого прохода в большинстве

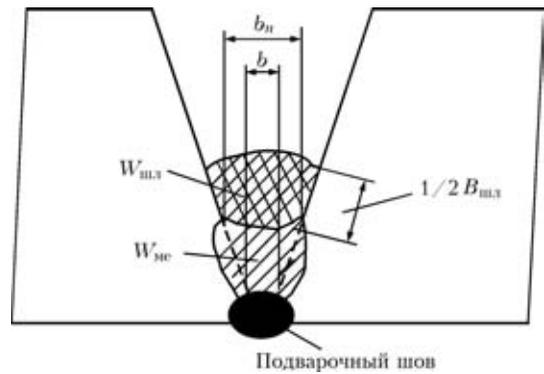


Рис. 1. Схема заполнения металлом шва и шлаковой коркой разделки стыка (обозначения см. в тексте)

случаев сварки без применения инструмента не удаляется из стыка.

Из анализа схемы образования металла шва и шлаковой корки в разделке стыка (рис. 1) следует, что ширина  $B_{шл}$  площади контакта шлака со стенками разделки зависит от объема  $W_{шл}$  и ширины металла шва в самом узком месте разделки (параметра  $b_n$ ). Однако при постоянстве тока и скорости сварки объем шлака  $W_{шл}$  является функцией напряжения дуги  $U_d$ , следовательно, при  $b = \text{const}$  возрастание  $U_d$  увеличивает ширину  $B_{шл}$  и, таким образом, ухудшает отделимость шлаковой корки. Кроме того, в общем случае причины ухудшения отделения шлака могут быть следующие: плохое формирование металла шва (наличие подрезов, острых углов по линии перехода, выступов и «гребенок» по оси шва), что обуславливает механическое заклинивание шлака; влияние коэффициента линейного расширения шлака; прилипание корки к поверхности металла шва, обусловленное химическими составами сварочных материалов.

Как показывает практика, наиболее трудно корка удаляется из самой глубокой части стыка с наименьшим расстоянием между его стенками. Спроецировав перечисленные выше факторы на описываемый случай сварки, можно предположить, что именно прилипание корки к поверхности стенок стыка является решающим фактором, влияющим на отделимость шлаковой корки при сварке в узкую разделку, поскольку используемые сварочные материалы при отсутствии разделки проблем с отделением шлака не имели. Из этого следует, что при постоянстве режима сварки объем шлака также постоянный и ширина  $B_{шл}$  зависит только от ширины шва предыдущего прохода, т. е. расстояния между стенками стыка, измеряемого по поверхности наплавленного металла (параметр  $b_n$ ) и напряжения дуги.

С целью проверки сделанного предположения была проведена наплавка валиков в канавки специального образца из стали 09Г2С, который имитировал реальный стык с глубокой разделкой (рис. 2). Канавки имели разный исходный



Т а б л и ц а 2. Режимы сварки и результаты испытаний флюса АН-47ДП на отделимость шлаковой корки

№ шва-прохода (параметр соединения $b_p$ , мм)	№ участка	$U_{дг}$ , В	$I_{св}$ , А	$v$ , м/ч	Формирование шва	Отделимость шлаковой корки	Средняя толщина наплавленного слоя, мм	Марка проволоки (диаметр, мм)	
1-1 (4)	1	30	550...600	31,5	Отличное	Удовлет.	4	Св-08ГА (4)	
	2	34				Неуд.	4		
	3	38				» »	—		
	4	42				Неуд.	—		
1-2 (6,9)*	1	29	550...600	31,5	Отличное	Отличная	4		
	2	30				» »	4		
	3	31				Удовлет.	3,5		
	4	32				» »	3		
1-3 (9,5)*	1	29	550...600	27,8	Отличное	Неуд.	2		
	2	30				Отличная	2		
	3	31				Удовлет.	2,5		
	4	32				Неуд.	2,5		
1-4 (11,3)*	1	31	550...600	27,8	Отличное	Отличная	2		
	2	32				» »			
	3	33				» »			
	4	34				» »			
1-5 (12,8)*	1	32	550...600	27,8	Отличное	Отличная	1,5		
	2	33				» »			
	3	34				» »			
2-1 (5)	1	28	550...600	31,5	Отличное	Отличная	4		
	2	29				» »			
	3	30				» »	Удовлет.		
	4	31				» »	Неуд.		
3-1 (4)	1	30	550...600	31,5	Отличное	Неуд.	4		
	2	31				» »			
	3	32				Удовлет.			
	4	33				» »			
3-2 (6,9)*	1	29	550...600	31,5	Отличное	Отличная	3		
	2	30				» »			
	3	31				» »	Удовлет.		
	4	32				» »	Неуд.		
3-3 (9,1)*	1	30	550...600	31,5	Отличное	Отличная	2,5		
	2	31				» »			
	3	32				» »			
	4	33				» »	Удовлет.		
3-4 (10,9)*	1	31	550...600	31,5	Отличное	Отличная	1,5		
	2	32				» »			
	3	33				» »			
	4	34				» »			
4-1 (4)	1	28	400...450	24,6	Отличное	Удовлет.	Не опр.	Св-08Г2С (3)	
	2	29				» »			
	3	30				» »			
4-2	1	28	500...550	24,6	Отличное	Отличная	»»		
	2	29				Неуд.	Удовлет.		
	3	30				Удовлет.	Неуд.		
4-3	1	28	500...550	24,6	Отличное	Отличная	»»		
	2	29				» »			
	3	30				» »			
5-1 (5)	1	29	500...550	24,6	Отличное	Удовлет.	»»		
	2	30				»»			
	3	31				»»			
5-2	1	29	550...600	27,8	Неуд.	Неуд.	»»		
	2	30				» »			
	3	31				» »			

\* — расчетное значение.

параметр ( $b = 4$  и  $5$  мм), что позволяло изучить отделимость шлака при наихудших условиях сварки, т. е. при наименьших значениях параметра  $b$ , и в широком диапазоне напряжения на дуге

и определить оптимальный режим сварки, при котором достигаются наилучшие условия отделения шлака.

С целью соблюдения одинаковых условий наплавки канавка была разделена на четыре участка длиной 150 мм, на каждом из которых режим наплавки отличался от предыдущего только более высоким напряжением дуги (см. табл. 2). Большую часть канавок наплавляли проволокой диаметром 4 мм (Св-08ГА), несколько канавок (для сравнения) заваривали проволокой диаметром 3 мм (Св-08Г2С); значение тока (постоянного, обратной полярности) было неизменным на протяжении одного прохода одной канавки и составляло 550...600 А при сварке проволокой диаметром 4 мм и 500...550 А для проволоки диаметром 3 мм. Скорость сварки при выполнении прохода была постоянной на всем протяжении канавки, однако изменялась на разных проходах в зависимости от предыдущих результатов наплавки. Она была максимальной на первом проходе (31,5 м/ч для проволоки диаметром 4 мм) и минимальной на последнем (24,6 м/ч для проволоки диаметром 3 мм). На всех проходах вылет электрода составлял 40 мм.

Отделимость шлаковой корки из разделки оценивали по трехбалльной системе: отличная — отделение шлака без применения инструмента; удовлетворительная — с применением инструмента без значительного усилия; неудовлетворительная — с применением инструмента и значительных усилий. На каждом проходе также по трехбалльной системе оценивали качество формирования металла швов: отличное — поверхность шва чистая, без подрезов, наплывов и других дефектов формирования; удовлетворительное — незначительное количество мелких неровностей на поверхности шва; неудовлетворительное — шов неровный с подрезами или наплывами.

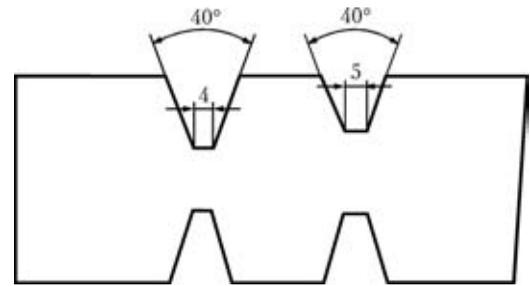


Рис. 2. Сечение пробы для определения отделимости шлаковой корки

Как видно из результатов испытаний флюса АН-47ДП на отделимость шлаковой корки, представленных в табл. 2, а также из рис. 3 и 4, с повышением напряжения на дуге при сохранении остальных условий сварки отделимость шлаковой корки ухудшается. Так, при выполнении первого прохода в канавке с параметром  $b_0 = 4$  мм на первом участке ( $U_d = 30$  В) корка заполнила примерно 1/3 объема разделки (рис. 3, а), на втором ( $U_d = 34$  В, рис. 3, б) — 2/3, третьем ( $U_d = 38$  В, рис. 3, в) — 4/5 и на четвертом ( $U_d = 42$  В, рис. 3, г) корка вышла за пределы разделки. При этом на первом участке корка удалялась практически самопроизвольно, на остальных это требовало значительных усилий. Формирование шва на первом и втором участках было практически одинаково хорошим — без дефектов, с плавным переходом к стенке стыка, причем поверхность шва была вогнутой и гладкой (рис. 3, д, е). Ширина площади контакта шлака со стенкой стыка на корке первого участка составила менее 2 мм (рис. 4, а), на втором — около 4 мм, на остальных участках этот параметр определить не удалось из-за полного разрушения корки при удалении. Следует отметить, что при хорошей отделимости шлаковой корки из разделки последняя, как правило,

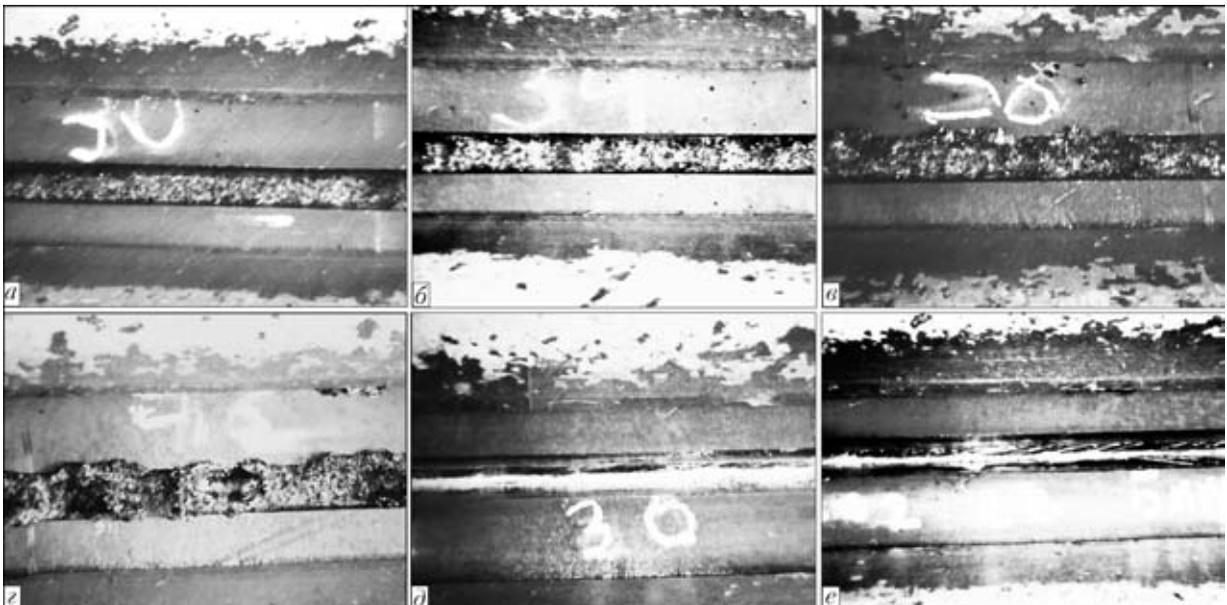


Рис. 3. Внешний вид внутренней поверхности шлаковой корки (а-в) и металла шва (д, е) (описание в тексте)

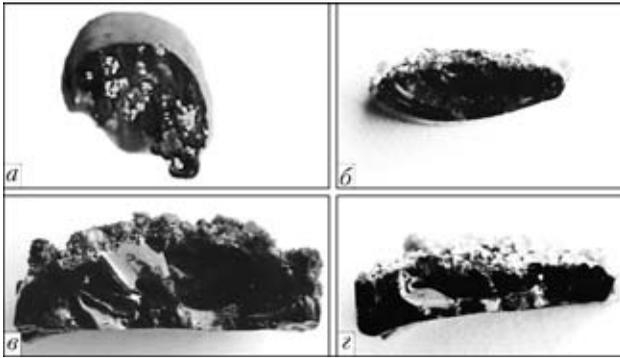


Рис. 4. Вид шлаковой корки при различном характере ее отделимости: *a* — отличная ( $U_d = 30$  В,  $b_0 = 4$  мм, № 1-1); *б* — отличная ( $U_d = 34$  В,  $b_3 = 4$  мм, № 1-4); *в* — неудовлетворительная ( $U_d = 30$  В,  $b_0 = 4$  мм, № 3-2); *з* — удовлетворительная ( $U_d = 31$  В,  $b_0 = 4$  мм, № 3-2)

имеет выпуклую (эллипсоидную) форму (рис. 4, *a*, *б*). При образовании плоской поверхности шва внутри разделки корка имеет угловатую форму (рис. 4, *в*, *з*) и отделяется, как правило, с затруднениями. Плохая отделимость шлаковой корки на четвертом участке обусловлена прежде всего неудовлетворительным формированием шва — по оси шва появились горбы и наплывы, а также подрезы и несплавления. Очевидно, что с повышением напряжения дуги в узкой разделке снижается стабильность процесса ее горения и, как следствие, ухудшаются формирование шва и отделимость корки. Следовательно, при данных размерах разделки хорошую отделимость шлака следует ожидать при меньшем напряжении дуги или увеличении параметра  $b$ . Для уточнения этого предположения были проведены расчеты ширины поверхности наплавленного слоя металла (параметров  $b_n$ ) для каждого направленного слоя по формуле:  $b_n = (0,3640 \cdot 2h) + b_0$ , где  $0,3640 = \text{tg } 20^\circ$ ;  $h$  — толщина наплавленного слоя металла. Из данных табл. 2 видно, что по мере заполнения разделки наплавленным металлом (при наложении следующего прохода или уменьшении скорости сварки) параметр  $b$  увеличивается и при постоянстве  $U_d$  отделимость шлаковой корки улучшается (проходы № 3-2, 3-3, 3-4). Такая же закономерность наблюдалась и при сварке проволокой диаметром 3 мм. Однако это справедливо только при стабильном режиме свар-

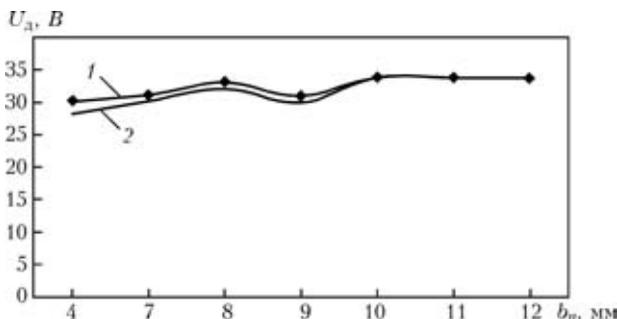


Рис. 5. Зависимость предельного значения  $U_d$  от параметра  $b_n$ : 1 — удовлетворительная отделимость; 2 — отличная

ки — в противном случае отделимость корки ухудшается (проходы № 4-1, 5-1, 5-2).

Характерно, что для каждого значения параметра  $b$  существует предельное значение  $U_d$ , выше которого наблюдается ухудшение отделимости корки (рис. 5). Так, установлено, что для  $b_n = 4 \dots 5$  мм напряжение  $U_d$  составляет 29...30 В, что подтверждают результаты наплавки первого прохода № 1-1, 3-1 ( $b = 4$  мм) и № 2-1 ( $b = 5$  мм): во всех наплавках отделимость корки самопроизвольная или легкая при  $U_d \leq 30$  В. При этом форма поверхности шва была вогнутой, с плавным переходом к основному металлу.

Для сравнения характера отделимости шлаковой корки флюса АН-47ДП с таковым других флюсов, сваривали канавки с  $b_0 = 4$  и 5 мм при напряжении дуги 29, 30, 31 и 32 В под флюсами АН-60 и АН-348-А. Во всех случаях сварки первого прохода корка отделялась с помощью инструмента при значительных усилиях, несмотря на хорошее формирование металла швов на первых участках канавки. При этом объем шлака в разделке во всех случаях заметно больше, чем при сварке под флюсом АН-47ДП. Вследствие плохой отделимости определить ширину площади контакта шлака  $B_{шл}$  со стенками стыка не удалось. Полученный результат указывает, очевидно, на то, что при одинаковом режиме сварки объем расплавленного в единицу времени флюса для разных марок флюсов различен и, следовательно, лучшую отделимость шлаковой корки из разделки обеспечивает флюс с минимальным значением указанного объема, поскольку в этом случае ширина  $B_{шл}$  минимальна.

С учетом полученных результатов исследований сварку контрольных стыков выполняли по следующей технологии: корень шва заваривали проволокой Св-08Г2С в смеси 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>, а затем выполняли проходы под флюсом (пять проходов с каждой стороны). Ток на всех проходах был неизменным (550...600 А для проволоки диаметром 4 мм и 500...550 А для проволоки диаметром 3 мм). Напряжение на дуге и скорость сварки для каждого прохода выбирали из табл. 2 и получали следующие значения: для проволоки диаметром 4 мм: первый проход 28...29 В и 27,8...31,5 м/ч; второй и третий — 29 В и 31,5 м/ч; четвертый — 29...31 В и 27,8 м/ч; пятый — 32 В и 24,6 м/ч.

Для проволоки диаметром 3 мм: первый – четвертый проходы — 29 В и 24,6 м/ч; пятый — 30...32 В и 21,7...27,8 м/ч.

При этом после выполнения каждого прохода шов охлаждался на воздухе до температуры ниже 200 °С, а с целью уменьшения деформации стыка пластины переворачивали и выполняли два последующих прохода. Полностью стык заваривали

**Т а б л и ц а 3. Показатели механических свойств сварных соединений, изготовленных под флюсом АН-47ДП на стали 09Г2С толщиной 40 мм проволоками фирмы «Multimet» IMT 9 (S2), IMT 6 (S2Mo), IMT 9Si (S2Si) и проволокой Св-08Г2С (SU31)**

№ шва	Марка проволоки (диаметр, мм)	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\varphi$ , %	Ударная вязкость KCV, Дж/см <sup>2</sup> (энергия удара по ISO-V, Дж) при температуре			
						+20 °С	0 °С	-20 °С	-40 °С
1	IMT 9 (4)	409,8 415,3	501,1 500,0	25,3 30,3	63,5 66,0	138,2...148,4 (114,6)	84,0...139,7 (86,8)	51,3...92,8 (53,3)	42,7...48,6 (35,8)
2	IMT 6 (4)	492,7 505,2	586,3 587,4	23,7 24,7	59,1 59,8	105,3...116,6 (88,0)	90,0...118,5 (84,5)	73,0...83,8 (61,5)	57,4...71,2 (50,8)
3	IMT 9Si (4)	421,7 434,9	523,7 545,4	30,0 31,7	60,0 62,1	134,0...152,6 (117,0)	108,1...120,2 (89,8)	83,4...108,1 (51,4)	42,5...61,2 (39,8)
4	Св-08Г2С (3)	546,6 585,1	642,0 659,4	25,0 27,3	55,4 59,8	158,2...189,7 (140,3)	115,4...142,8 (99,9)	54,5...103,7 (61,3)	56,1...60,0 (46,6)



Рис. 6. Металл шва, сваренный под флюсом АН-47ДП с проволокой IMT 9 (пять проходов с каждой стороны)

за пять проходов с каждой стороны, при этом раскладку швов не применяли.

Сварка контрольных стыков показала, что выбранный режим обеспечивал хорошее формирование швов и легкую отделимость шлаковой корки уже на первом проходе. Благодаря физико-механическим свойствам шлака флюса АН-47ДП его корка растрескивалась при охлаждении на всех без исключения последующих проходах и отделялась самопроизвольно.

Процесс заполнения разделки на всех контрольных стыках отличался идентичностью режимов сварки и отсутствием пор, трещин и других дефектов в металле шва (рис. 6).

Показатели механических свойств полученных соединений были выше требуемого (47 Дж при -20 °С). Нейтральный характер шлаковой основы

флюсов, содержащих ZrO<sub>2</sub>, и ее способности противостоять образованию силикатных включений в металле швов [3] позволил при сварке под новым флюсом обеспечить необходимое легирование металла шва при использовании сварочных проволок, содержащих марганец или молибден. Так, если достигнутый уровень ударной вязкости превышал требуемый при всех вариантах сварки на 10...30 %, то для проволок с молибденом (IMT 6) и марганцем (Св-08Г2С) заданный уровень хладостойкости сохранился даже при более низкой температуре испытаний (-40 °С). Из этих данных следует, что применение флюса АН-47ДП вполне отвечает требованиям технологии многослойной однодуговой сварки толстостенного проката как в отношении сварочно-технологических свойств (бездефектное формирование швов, легкая отделимость шлаковой корки из глубокой канавки), так и показателей прочности, пластичности и стойкости металла швов против хрупкого излома.

Таким образом, новый плавный флюс марки АН-47ДП, изготовленный методом двойного рафинирования расплава, может быть рекомендован для производства сварных конструкций ответственного назначения из низколегированных сталей в сочетании с проволоками того же класса.

1. Флюс для сварки трубопроводов из низколегированных сталей повышенной прочности / А. В. Залевский, В. И. Галинич, В. В. Подгаецкий и др. // Автомат. сварка. — 1977. — № 3. — С. 49.
2. International standard ISO 14171:2002. Welding consumables — Wire electrodes and wire-flux combinations for submerged arc welding of non alloy fine grain steels — Classification.
3. Залевский А. В., Парфессо Г. И., Маркашова Л. И. О металлургической роли двуокиси циркония в сварочных флюсах // Автомат. сварка. — 1982. — № 4. — С. 54.

The paper gives the results of testing a new fused flux designed for welding higher strength low-alloyed steels. The flux, designated AN-47DP, was developed under the innovation project of the E.O.Paton Electric Welding Institute Technology Park. The flux is produced by the method of double refining.

Поступила в редакцию 25.06.2007

**РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ СВАРКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ****ИЭС им. Е. О. Патона ПРЕДЛАГАЕТ****ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

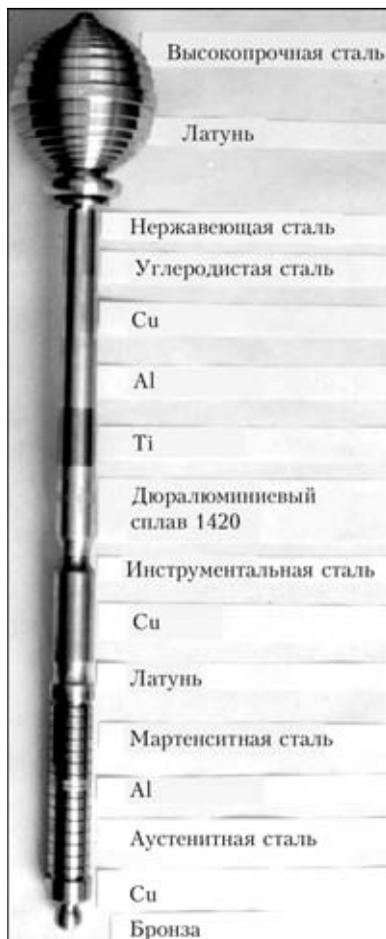
Сваркой трением удастся успешно соединять материалы, отличающиеся по своим механическим и теплофизическим характеристикам, а также материалы, вступающие в процессе совместного нагрева в химическое взаимодействие и образующие хрупкие интерметаллические соединения.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработаны технологии и режимы сварки трением различных металлов и сплавов в однородном и разнородном сочетании и созданы промышленные технологии сварки конкретных изделий из различных комбинаций металлов и сплавов, в том числе:

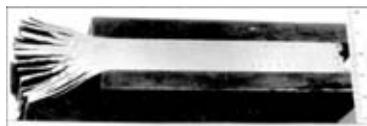
- инструментальных сталей с конструкционными (составной концевой металлорежущий инструмент);
- коррозионностойких сталей с конструкционными (валы химических насосов, ролики отделочных машин текстильного производства);
- жаропрочных сталей с конструкционными (биметаллические клапаны двигателей автомобилей, роторы турбокомпрессоров дизелей);
- легированных высокопрочных сталей с углеродистыми равно- и неравно-го сечения (корпуса гидроцилиндров, штоки поршней, валы аксиально-поршневых гидромашин);

**КОНТАКТНАЯ СТЫКОВАЯ СВАРКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛИ, АЛЮМИНИЯ, МЕДИ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Разработаны новые прогрессивные технологии контактной стыковой сварки сопротивлением с композиционной вставкой различных конструкционных материалов и их сочетаний. Отличительной особенностью технологии является применение композиционной токопроводящей вставки, обеспечивающей равномерный концентрированный нагрев по торцу



- термически упрочненных и нагретых алюминиевых сплавов (панели из сплава АМг6НПП со шпильками из сплава Д16Т);



Нахлесточное соединение пакета алюминиевых шин со стальными. Переходник, катада электролизера площадью 20 000 мм<sup>2</sup>

стыка, а также создание определенных условий при деформации металла шва. Данные технологии характеризуются высоким термическим КПД, малыми припусками на осадку и позволяют получать высококачественные стыковые соединения черных и цветных металлов, их

- меди и алюминия с металлокерамикой (контакты электроаппаратуры);

- меди, бронзы и латуни со сталью (блоки цилиндров аксиально-поршневых гидромашин);

- алюминия и его сплавов со сталью (биметаллические переходники для приборов авиакосмической техники);

- алюминия с медью (переходники для электротехнической промышленности);

- титана со сталью.

Для реализации технологий создана серия специализированных машин для сварки заготовок диаметром 10...100 мм. Машины характеризуются простотой конструкции, надежностью и долговечностью, высокой степенью автоматизации и производительностью. Отличительной особенностью машин для инерционной сварки трением является применение разработанного в ИЭС электромагнитного силового привода, обеспечивающего упрощение конструкции машины, высокую надежность, быстрдействие, стабильность режима сварки, возможность изменения осевого усилия по любой программе.

*Назначение.* Сварка деталей для машиностроения, электротехнической, автомобильной, авиакосмической и других отраслей промышленности.

сочетаний и различных композиционных материалов.

*Назначение.* Данные технологии предназначены для решения актуальных производственных задач при сварке изделий из углеродистой и низколегированной стали, алюминия и алюминиевых сплавов различного профиля и сечений, изделий из меди и ее сплавов и композитов на основе меди, сталеалюминиевых переходников токоведущих шин большого сечения (более 20000 мм<sup>2</sup>) и могут применяться в различных отраслях промышленности, как энергетике, строительстве, машиностроении.



## КОНТАКТНАЯ СТЫКОВАЯ СВАРКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ, МАГНИЯ, ТИТАНА, НЕРЖАВЕЮЩИХ И ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Разработаны технологии и оборудование для контактной стыковой сварки различных изделий из сплавов на основе алюминия, магния, титана, нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов с площадью поперечного сечения до 40000 мм<sup>2</sup>, в том числе колец из прессованных профилей, плит и поковок высокопрочных сплавов на основе алюминия диаметром более 500 мм, листов шириной до 2000 мм, толщиной до 50 мм и продольных швов обечаек из этих листов диаметром более 2000 мм.

В частности, разработаны технологии контактной стыковой сварки оплавлением высокопрочных алюминиевых сплавов в однородном и разнородном сочетаниях, а также специализированное оборудование для их реализации.

Эти технологии применяются для соединения практически всех высокопрочных алюминиевых сплавов без применения сварочных



Контактная стыковая сварка шпангоутов на машине К393



Контактная стыковая сварка обечаек на машине К767

материалов и обеспечивают:

- коэффициент прочности сварного соединения не менее 0,9 (таблица);
- высокую точность размеров деталей с большим сечением (отклонение по периметру ±1 мм) и отсутствие напряжений;
- высокую производительность (время сварки — 2–3 мин).

## УСТАНОВКА ДЛЯ ЭЛС В ЛОКАЛЬНОМ ВАКУУМЕ ВРЕЗНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

Разработана специализированная установка для ЭЛС в локальном вакууме врезных элементов оболочечных конструкций большого диаметра из высокопрочных алюминиевых сплавов Al–Cu, Al–Mg–Mn, Al–Mg–Li, Al–Cu–Mg–Si. В ней предусмотрено использование пер-



сонального компьютера и программируемых контроллеров. В установке осуществляется визуализация

## ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛС ЕМКОВЫХ И ДРУГИХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ТОЛЩИНОЙ СТЕНКИ ДО 150 мм ИЗ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ

Разработана комплексная технология изготовления с применением электронно-лучевой сварки цилин-

дрических или конических оболочек и емкостей диаметром от 300 до 8000 мм, используемых в качестве корпусов ракетно-космических аппаратов, топливных систем, сосудов давления или криогенных емкостей, из алюминиевых и магниевых сплавов. Кроме операций сварки, технология решает пробле-

Марка сплава (система)	$K = \frac{\sigma_{св.с}}{\sigma_{о.м}}$
AMr6 (Al–Mg)	0,95
1570 (Al–Mg–Sc)	0,92
1201 (Al–Cu)	0,90
Д16 (Al–Cu–Mg)	0,90
B95 (Al–Zn–Cu–Mg)	0,90
AK6 (Al–Cu–Si)	0,92
1420 (Al–Mg–Li)	0,95
1460 (Al–Cu–Li)	0,90
1915 (Al–Zn–Mg)	0,90
AMr6 + 1201	0,90
Д16 + AK6	0,90
B95 + AK6	0,90
1460 + AMr6	0,90

*Назначение.* Разработанные технологии и оборудование предназначены для изготовления колец и обечаек корпусов ракетной и авиационной техники и деталей двигателей. Они могут также применяться как для сварки изделий типа ободьев колес велосипедов, мотоциклов, автомобилей, различных элементов строительных конструкций, так и для сварки крупногабаритных емкостей для химической, пищевой, металлургической промышленности, использоваться в судостроении и т. п.

зоны сварки с помощью видеоконтрольного устройства, основанного на принципе эмиссии вторичных электронов (10-кратное увеличение). Она комплектуется источником питания с системой защиты от пробоев, отличающейся высокой стабильностью.

Мощность луча до 15 кВт при ускоряющем напряжении 60 кВ.

Применение ЭЛС вместо аргонодуговой сварки позволяет снизить остаточные напряжения в зоне врезного элемента в 5–6 раз.

мы конструктивного исполнения свариваемых кромок различных типов соединений, подготовки по-

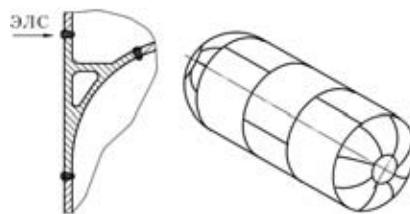




верхности изделий и кромок перед сваркой, выполнения требований к точности сборки и выбору пространственного положения соедине-

ний, а также выбора рациональных способов контроля качества и прочностных испытаний сварных соединений при криогенных температурах включительно.

Технология обеспечивает повышение на 15...25 % временного сопротивления соединений термически упрочняемых и усиленно нагартованных алюминиевых сплавов, уменьшение в 4–5 раз остаточ-

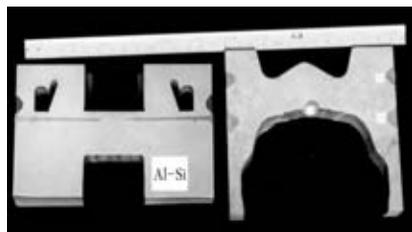
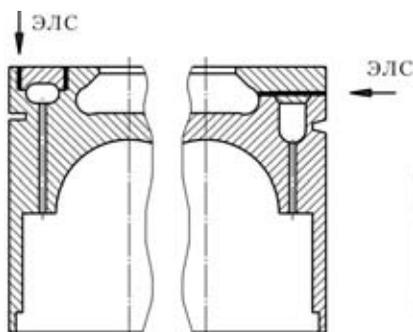


ных сварочных деформаций и в 5–7 раз ширины зоны термического влияния по сравнению с дугowymi способами сварки.

### ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛС ПОРШНЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С ПОЛОСТЬЮ МАСЛЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВОКРУГ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

Для повышения надежности работы дизелей и увеличения срока эксплуатации поршней используют способы принудительного охлаждения наиболее теплонапряженных участков поршня посредством циркуляции охлаждающего масла через полости, выполненные в донной части поршня. При этом наиболее полно отвечают требованиям и не сложны в изготовлении при массовом производстве сварнолитые поршни из алюминиевых сплавов.

Разработанная конструкция и технология изготовления сварных поршней позволяет выбрать наиболее рациональную форму полос-

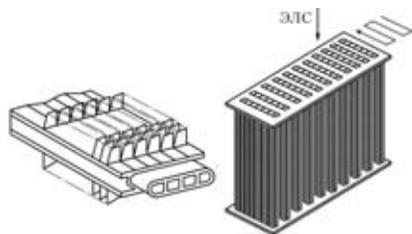


ти охлаждения, оптимальное место ее расположения и практически в 2 раза уменьшить трудоемкость их

изготовления по сравнению с известными вариантами.

### ЭЛС РЕБРИСТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ (РАДИАТОРОВ) ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Разработана экологически чистая безотходная технология изготовления высокоэффективных теплообменных аппаратов из алюминия и его сплавов. Это позволяет уменьшить в 3–4 раза весовые характеристики радиаторов по сравнению с обычными из меди или латуни, улучшить на 40–60 % их теплотехнические показатели. Использование электронно-лучевой сварки при соединении ребренных трубчатых элементов с трубной доской обеспечивает равнопрочность сварных соединений с основным



металлом, практически полное отсутствие деформации и сохранение в исходном состоянии жесткости тонкостенных ребер.

Основные операции разработанной технологии являются экологически чистыми и легко поддаются автоматизации и механизации.

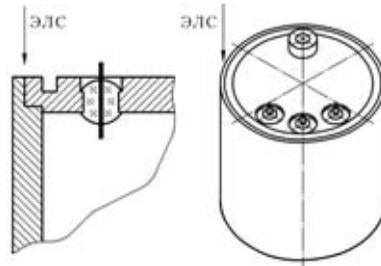
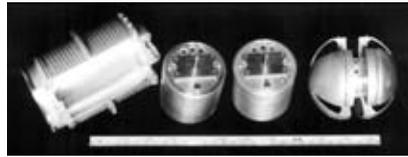
*Область применения.* Алюминиевые теплообменники (радиаторы) могут применяться в автомобиле- и тракторостроении, авиационной промышленности, холодильных установках или компрессорных станциях, кондиционерах и т. д.



### ЭЛС ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ И ГЕРМЕТИЗАЦИЯ КОРПУСОВ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ

Разработана прецизионная электронно-лучевая сварка корпусов электровакуумных приборов, гироскопов и герметизации микросхем в алюминиевых оболочках, используемая в качестве финальной операции изготовления высокоточных приборов.

Технология обеспечивает минимальные сварочные деформации (не более 0,03 мм на диаметре до 100 мм), незначительный (не выше



60 °С) разогрев расположенных внутри корпуса или оболочки элементов монтажа и микросхем, а также допускает расположение гермовыводов на корпусе прибора на расстоянии до 2 мм от сварного шва, при уплотнении которых с корпусом используют клей или герметики различного состава.

Использование комплекса технических рекомендаций обеспечивает получение качественных сварных швов, а также высокую надежность и работоспособность приборов в сложных условиях эксплуатации.

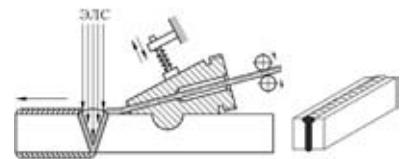
### ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛС ЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ОДНОВРЕМЕННОЙ ПОДАЧЕЙ В СВАРОЧНУЮ ВАННУ ПРИСАДОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ

В производстве сварных конструкций различного назначения большой объем занимают полуфабрикаты в виде листовых заготовок. При этом в силу специфических особенностей процесса электронно-лучевой сварки алюминиевых сплавов формирование соединений происходит с некоторым занижением поверхности металла шва относительно верхней плоскости свариваемых листов.

Для предупреждения указанно-

го дефекта сварных соединений листовых заготовок разработана технология ЭЛС с одновременной подачей присадочной проволоки в сварочную ванну. Сварка может осуществляться в различных пространственных положениях и без применения формирующих устройств. Сварные швы при этом наплавляются с формированием валика усиления и проплавления с обратной стороны стыка.

В процессе сварки присадочная проволока диаметром 0,8...2,6 мм может подаваться в сварочную ванну с любой стороны относительно фронта плавления. Это особенно важно в случае одновременного



применения устройств совмещения и направления пучка по стыку, когда стык перед пучком не должен быть «закрытым».

Разработанная технология и механизм подачи присадочной проволоки могут также использоваться при выполнении наплавочных работ, облицовке поверхности, заполнении широких зазоров в соединении при многопроходной сварке.

### ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНЫХ ОРЕБРЕННЫХ ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

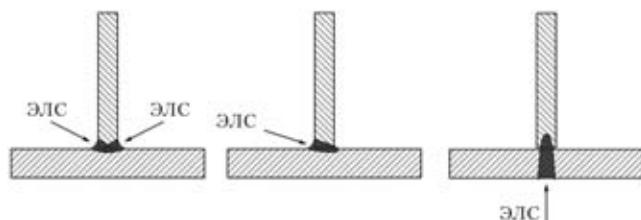
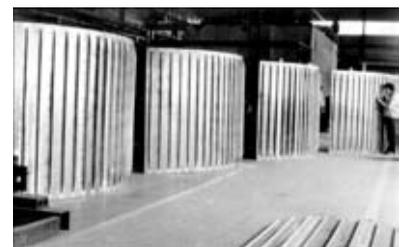
В крупногабаритных корпусных легких конструкциях аэрокосмической техники, в судостроении и на транспорте широко используются тонкостенные панели — листовые полотноща с набором ребер жесткости из легких сплавов. Изготовление этих панелей с помощью горячего прессования осуществимо, но только для высокопластичных сплавов и при определенных соотношениях размеров сечений листа и ребер.

Разработана современная технология изготовления сварных панелей, по которой ребра жесткости любого поперечного сечения при-

вариваются к тонкому листу. При применении разработанной технологии, основанной на использовании метода предварительного упругого растяжения, происходит подавление остаточных деформаций.

Приварка ребер жесткости к полотнищу может осуществляться двух- и односторонним угловым или прорезным швом. При этом соотношение толщин ребра и полотнища может составлять от 1:1 до 1:10 и выше. Наиболее высокие показатели конструктивной прочности имеют панели, изготовленные из высококо-

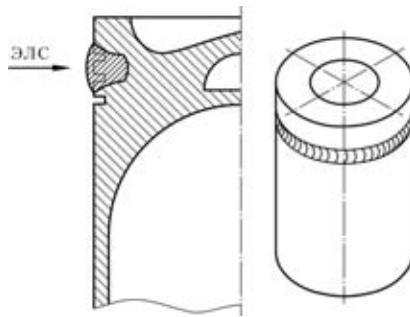
рочных алюминиевых сплавов с применением электронно-лучевой сварки. Остаточный продольный прогиб таких панелей составляет не более 1 мм на один погонный метр длины панели.





### ТЕХНОЛОГИЯ УПЛОТНЯЮЩЕЙ НАПЛАВКИ С ПРИСАДОЧНЫМ МАТЕРИАЛОМ ЗОНЫ КОМПРЕССИОННЫХ КАНАВОК АЛЮМИНИЕВЫХ ПОРШНЕЙ

В настоящее время усовершенствование двигателей внутреннего сгорания, в частности, дизелей, идет в направлении повышения их мощности, снижения металлоемкости и увеличения долговечности. В этой связи особое значение приобретают проблемы увеличения срока службы поршней, поскольку с повышением мощности двигателей существенно возрастают тепловые и динамические



нагрузки на поршень.

Для повышения износостойкости и срока эксплуатации алюминиевых поршней разработана технология износостойкой уплотняющей наплавки поршней в зоне

верхней компрессионной канавки с использованием легирующих присадок и высококонцентрированного нагрева электронным пучком.

Применение легирующего материала дает возможность получить необходимую твердость зоны упрочнения в пределах *HB* 150–180. Горячая твердость упрочненного слоя в интервале температур 100...360 °С в 2–3 раза выше по сравнению с основным металлом поршня.

Разработанная технология упрочнения поршней позволяет повысить моторесурс поршневой группы двигателей в 1,5–2 раза.

### ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОРЕБРЕННЫХ ПАНЕЛЕЙ И ОБОЛОЧЕК ИЗ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ

Новая технология основана на применении как электронно-лучевой, так и аргодуговой сварки плавящимся электродом, выполняемых с большой скоростью, в сочетании с предварительным упругим деформированием соединяемых деталей. Ребра жесткости приваривают к тонколистовому элементу

двусторонним угловым швом с малыми катетами и полным проваром по толщине ребра.

В результате обеспечивается высокая точность изготовления крупногабаритных конструкций, низкий уровень остаточных сварочных напряжений и деформаций, узкая зона разупрочнения основного металла в околошовной зоне, высокое качество сварных соединений.

По сравнению с широко используемым фрезерованием толстолистовых заготовок и горячим прессованием панелей стоимость изготов-



ления панельных конструкций по предлагаемой технологии ниже, при этом значительно возрастает коэффициент использования металла, расширяются конструктивные возможности изготовления высокоэффективных конструкций.

### ПЛАЗМЕННО-ДУГОВАЯ СВАРКА АЛЮМИНИЯ С УГЛЕРОДНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

В мощных электротермических печах сопротивления таких, как печи Ачесона, используемых для графитации углеродных материалов (токи до 200 тыс. А) и для синтеза карбида кремния (токи до 30 тыс. А), металлические шины в которых соединяются с электродами (тоководами) с помощью прижимных контактов, чаще всего болтовых. Ошиповка печей обычно выполняется дорогостоящей и дефицитной в условиях Украины медью.

Контактные сборки таких печей работают в циклическом режиме — нагрев до 400...500°С и охлаждение до внутрицеховой температуры, что вызывает окисление контактной поверхности металлической пади контакта и связанный с этим явлением

стремительный рост контактного сопротивления. Так, например, в печах графитации Днепровского электродного завода контактное сопротивление после нескольких компаний работы печи ( $I \sim 100 \cdot 10^3$  А) повышается с 70...100 до 15000 мкОм. В связи с этим потери электроэнергии в конце периода достигают 19,6 % общей мощности печи.

В Институте электросварки им.

Е. О. Патона НАН Украины разработан новый способ сварки разнородных материалов металл–углеродистый материал, который позволяет значительно снизить удельный расход электроэнергии на производство продукции в электротермических печах.

Сварное электроконтактное соединение металлических шинопроводов электродами на углеродных



Рис. 1. Печь сопротивления на токи до 30 кА для синтеза карбида кремния



Рис. 2. Печь сопротивления на токи до 100 кА для графитации углеродных материалов



материалах выполняется в виде электроконтактных пробок, каждая из которых способна длительное время работать на токах до 600 А (соединение алюминий–углеродный материал).

Контактное сопротивление сва-

рных соединений, измеренных при контактной температуре, падает при нагреве соединения до рабочей температуры на 25...30 %, но самое главное, при длительной работе печи не возрастает. Кроме экономии электроэнергии, использование тех-

нологии изготовления сварных контактов позволяет отказаться от медных шинопроводов, заменив их легкими и более дешевыми алюминиевыми шинами. Технология успешно внедрена на ПО «Графит» (г. Запорожье).

### КОМПЛЕКС ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СВАРКИ ТОЛСТОЛИСТОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Качественная и высокопроизводительная сварка конструкций из алюминия и его сплавов с минимальными энерго- и ресурсозатратами — актуальная технико-технологическая проблема во многих отраслях промышленности. В последнее время острота этой проблемы еще более усилилась вследствие повышения требований к качеству сварных соединений мощных шинопроводов для энергогенерирующих и электрометаллургических предприятий, включая предприятия по электролизу цветных металлов. Здесь экономия электроэнергии в больших объемах напрямую зависит от качества сварного соединения. Весь этот комплекс проблем на базе ряда предприятий по электролизному производству алюминия (ТАДаЗ, Таджикистан), АВИСМА (Россия) был учтен в ИЭС им. Е. О. Патона при разработке оригинальных технологий и оборудования. Они включают:

- полуавтомат для дуговой сварки алюминия и его сплавов типа ПШ2107А (рис. 1), который может быть укомплектован практически любым типом источника сварочного тока с определенной доработкой статических и динамических характеристик. Отличительными и определяющими характеристиками ПШ2107А является возможность

надежной подачи алюминиевых электродных проволок диаметром 1,2...3,5 мм, а также точная установка и поддержание режимов сварочного процесса. Обеспечивает сварку конструкций из алюминиевых сплавов толщинами до 20 мм. Рис. 2 иллюстрирует вертикально выполненные соединения алюминиевых шин магниевого электролизера с помощью полуавтомата ПШ2107А.

- установку «ТРИПЛЕТ» для дуговой сварки алюминия и его сплавов с одновременной или поочередной подачей трех электродных проволок в один токоподводящий наконечник с использованием

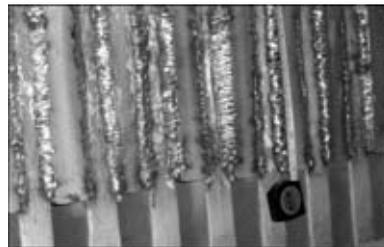


Рис. 2. Сварка алюминиевых шин

одного источника сварочного тока. Преимущества такого способа сварки состоят в значительном повышении производительности процесса, существенной экономии энергии и ресурсозатрат, использовании возможностей модуляции процесса сварки за счет поочередной подачи по определенному алгоритму каждой из трех проволок. Маневренность оборудования обеспечивается несколькими вариантами конструктивного исполнения (механизированный, автоматический). Вариант конструкции «ТРИПЛЕТА» представлен на рис. 3. Рекомендуется использовать при сварке конструкций с толщиной свариваемых изделий в диапазоне 10...60 мм;

малогабаритный (переносный) автомат для производительной многослойной сварки протяженных толстолистовых алюминиевых конструкций, например шин, продольных швов емкостей и др. с механиз-

мами подачи электродной проволоки диаметром до 4,0 мм с устройствами перемещения, корректировки, раскладки швов и управления циклом сварки с автоматическим возбуждением дуги (рис. 4). Рекомендуется использовать при сварке конструкций толщинами в диапазоне 20...100 мм.

Дополнительные возможности по энерго- и ресурсосбережению в



Рис. 3. Триплет

рассмотренном оборудовании обеспечивают управляемые импульсные процессы, реализуемые, в том числе при использовании оригинальных регулируемых импульсных механизмов подачи.

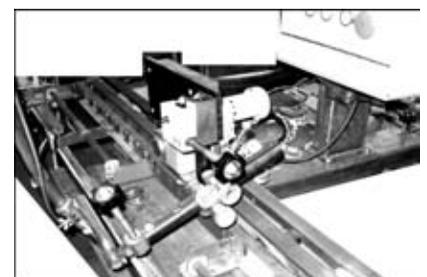


Рис. 4. Автомат для многослойной сварки алюминиевых конструкций



Рис. 1. Полуавтомат ПШ2107



## НОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ФИРМЫ «ФРОНИУС» ДЛЯ СВАРКИ АЛЮМИНИЯ

### TransPuls SYNERGIC 2700 СВАРКА ПО СИСТЕМАМ MIG/MAG, WIG DC И СО СТЕРЖНЕВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

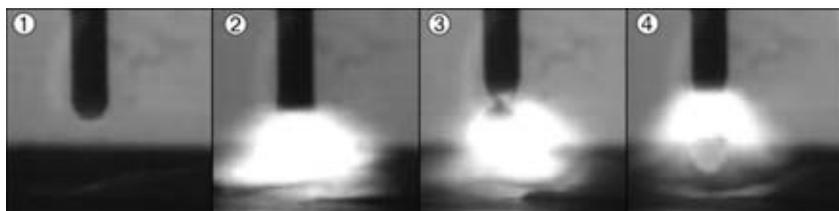
Установка TPS 2700 — это особый источник сварочного тока. Полностью цифровой источник, который дает абсолютно точные результаты сварки. Благодаря режиму «Synergic» обращение с ним очень простое, а небольшая масса (27 кг) и встроенный привод механизма подачи проволоки делают установку

предлагаются соответствующие комплектующие, включающие сварочные горелки, установки охлаждения и приборы дистанционного управления. Весь комплекс точно подогнан к способностям источника сварочного тока и представляет собой единую оптимизированную систему.

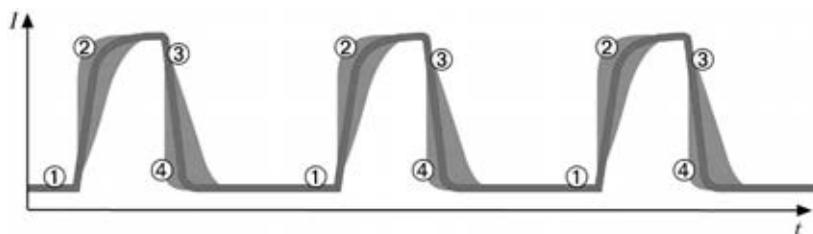
Прибор TPS 2700 AluEdition специально разработан и имеет множество функций и принадлежностей для сварки алюминия. Он пригоден для выполнения различных сварочных работ с алюминием, а также при ис-

до мощности тока заварки кратера.

Важную роль во время любого сварочного процесса играет подача проволоки. Она непосредственно влияет на результат сварки и должна протекать надежно и точно при минимальном трении. Встроенным узлом установки TPS 2700 является высококачественный четырехроликковый привод механизма подачи проволоки. В качестве варианта для транспортировки мягкой алюминиевой проволоки предлагается планетарный привод «PT-Drive». Цифровой регулятор оборотов двигателя позволяет точную и



Перенос металла осуществляется благодаря импульсной дуге — одна капля на один импульс



Основной металл — AlMg3  
Толщина металла — 0,6 мм  
Присадочная проволока — AlMg5  
диаметром 1,2 мм

переносной и пригодной для любой мобильной операции. К тому же, для каждого случая применения

пользования очень мягкой алюминиевой проволоки или длинных кабелей/шланг-пакетов.

Дополнительная возможность зажигания предлагается для сварки алюминия: во избежание непровара основной металл должен быть расплавленным уже во время фазы зажигания. По этой причине зажигание осуществляется на значительно повышенном токе, затем мощность снижается. По завершению сварки шва, чтобы избежать опасности прожога, его уровень может быть снижен



В источник питания интегрирован четырехроликковый привод для точной и беспрепятственной подачи проволоки

воспроизводимую бесступенчатую настройку скорости проволоки от 0 до 22 м/мин.



## MagicWave 4000/5000 СВАРКА TIG И ЭЛЕКТРОДНАЯ СВАРКА

Данные источники тока с любой точки зрения вполне отвечают духу современности: выделяются своей малощумностью (с электрической дугой практически едва слышной и в то же время очень стабильной); простотой в управлении, понятной и логичной системой управления; прочной конструкцией аппаратов, их большой производительностью и полным цифровым управлением процессами, что для аппаратов аргонодуговой сварки TIG является уникальными характеристиками.



Алюминий всегда нуждается в специальном обращении, он его и заслуживает. Так, при сварке алюминия переменным током процессом TIG, как правило, используется не заостренный электрод, а электрод со сферической контактной поверхностью. В случае сварки угловых швов это приводит к недостаточному провару корня шва. Аппараты MagicWave при заостренном электроде обеспечивают сферическую контактную поверхность значительно меньшего диаметра, что обеспечивает оптимальный провар корня.

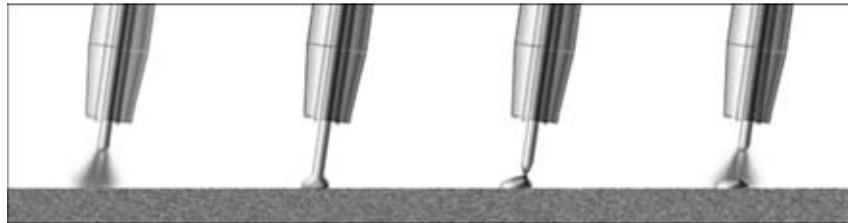
Сферическая контактная поверхность образуется автоматически, что значительно экономит рабочее время. Только монтируется заостренный электрод, регулятором задается нужный диаметр сферической контактной поверхности, и импульс

тока обратной полярности сразу же его образует. Другая интересная функция позволяет производить настройку формы кривой переменного тока с целью сохранения стабильности жидкой ванны при высокой силе тока.

### CMT: COLD METAL TRANSFER

Новая технология резко отличается от традиционной. Система CMT представляет собой абсолютную инновацию. Для введения ее на рынок понадобилось пять лет интенсивной исследовательской работы. В стадии разработки находятся и другие перспективные продукты данного сектора.

Перенос материала почти без тока. Проволока подается, а при возникновении короткого замыкания она сразу же автоматически отводится. Таким образом, в течение фазы горения дуга вводит тепло в короткий миг, затем сразу же ввод тепла сок-



ращается (горячо–холодно–горячо–холодно–горячо–холодно).

Результатом переноса материала без образования брызг является третья значительная разница: отвод проволоки в момент возникновения короткого замыкания помогает отделению капли. Короткое замыкание под контролем, ток короткого замыкания незначителен, что обеспечивает перенос материала без образования брызг.

Все эти процессы позволяют осуществлять именно те операции, которые до сих пор были связаны с большими трудностями: сварные и паяные швы без образования брызг; сварное соединение стали с алюминием; сварка сверхтонкого листа с 0,3 мм даже стыковым швом без подкладки сварочной ванны и т. п.

Вся система приспособлена к сварочному процессу.

Процесс CMT устанавливает новые стандарты в сварочной технике: управляет переносом капель благодаря вводу блоков подачи проволоки с цифровой регулировкой процесса;

за счет переноса материала почти без тока уменьшает ввод тепла;

путем контроля за возникновением короткого замыкания обеспечивает перенос материала без образования брызг;

обеспечивает роботизированную сварку и пайку по системе MIG/MAG сверхтонкого листа с 0,3 мм и соединение стали с алюминием без образования брызг.

Открываются абсолютно новые области применения. Каковы типичные области применения процесса CMT? Каким материалам необходим «холодный» процесс? Любой тонкий или сверхтонкий лист, уже с 0,3 мм; пайка оцинкованного листа по технологии MIG; соединение стали с алюминием. До сих пор такие операции можно было выпол-

нить только при соблюдении самых сложных условий (например, сварке на подкладке), или они вообще заменялись другими технологиями соединения при отказе от преимуществ сварного соединения. С появлением процесса CMT невозможное стало возможным.

Процесс CMT устанавливает новые стандарты сварочной техники. Процесс идеально пригоден для автомобильной промышленности и производства комплектующих к ней, авиационной промышленности и космонавтики, изготовления металлических и порталных конструкций. С помощью данного процесса можно выполнять все задачи, осуществляемые в автоматизированном режиме или с поддержкой робота; возможно применение всех основных и присадочных материалов.



## ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины



**Н. О. Червяков** (ИЭС) защитил 10 октября 2007 г. кандидатскую диссертацию на тему «Напряженно-деформированное состояние и технологическая прочность сварных соединений высокопрочных никелевых сплавов».

Диссертация посвящена изучению особенностей тер-

модеформационных процессов применительно к оценке трещиностойкости сварных соединений и разработке на этой основе рекомендаций по выбору эффективных технологических приемов создания качественных сварных соединений высокопрочных ( $\sigma_B \sim 1000$  МПа) никелевых дисперсионно-твердеющих сплавов с  $\gamma'$ -упрочнением.

Исследована свариваемость никелевых сплавов методом Varestraint Test. Построены температурные интервалы хрупкости никелевых сплавов с содержанием  $\gamma'$ -фазы от 40 до 60 %. Показано наличие двух температурных интервалов хрупкости — высокотемпературного (ТИХ-I) и низкотемпературного (ТИХ-II). Определены протяженность температурных интервалов хрупкости и критической деформации для каждого интервала, превышение которой вызывает появление трещин. Установлено, что при сварке никелевых сплавов наиболее критичным является образование поперечных трещин в низкотемпературном интервале провала пластичности (ТИХ-II) в диапазоне температур 1150...700 °С.

Экспериментально изучено распределение остаточных напряжений и деформаций и показано, что с увеличением содержания  $\gamma'$ -фазы в сплаве с 40 до 60 % максимальные растягивающие остаточные продольные напряжения изменяются от 750 до 950 МПа и пропорциональны пределу текучести материала. Установлено, что пластическая деформация локализуется на расстоянии до 1000 мкм от линии сплавления в сторону основного металла и ширина зоны образования трещин совпадает с размером зоны пластической деформации. Изучены температурные условия формирования сварного соединения путем непосредственного измерения термических циклов в зоне термического влияния (ЗТВ) на различном удалении от оси шва. Рассмотрено влияние параметров режима процесса сварки неплавящимся воль-

фрамовым электродом в защитном газе аргоне на параметры сварочной ванны и шва. Для исследования была собрана установка, позволяющая в процессе сварки производить видеосъемку поверхности движущейся сварочной ванны и формирования шва, по результатам которой определялась форма и геометрические размеры зеркала жидкой ванны. Полученные данные использовались в дальнейшем для уточнения математической модели.

Экспериментально определены механические и теплофизические свойства исследуемого сплава при температурах выше 1000 °С — предела текучести и коэффициента линейного расширения, которые являются важными параметрами для моделирования термомодеформационных процессов в шве и ЗТВ. Максимальные значения коэффициента линейного расширения составляют для сплава ЖС-26  $60 \cdot 10^{-6}$  1/°С, причем практически двукратное увеличение его значения на стадии нагрева происходит в интервале температур 1000...1200 °С. Предел текучести при комнатной температуре составляет 950 МПа, а при нагреве до температуры 900 °С плавно уменьшается до 850 МПа; резкое падение предела текучести до 100 МПа происходит в интервале температур 950...1100 °С.

С позиций оценки вероятности образования околошовных горячих трещин при сварке плавлением никелевых дисперсионно-твердеющих сплавов экспериментально-расчетным методом определен уровень и изучена кинетика развития напряженно-деформированного состояния во время формирования сварного соединения. Расчетным путем изучены закономерности распределения и особенности развития локальных пластических деформаций в ЗТВ никелевых сплавов и установлено, что на стадии охлаждения продольные пластические деформации локализируются в узкой (до 1000 мкм) зоне, прилегающей к линии сплавления, и имеют положительные приращения, значения которых на макроуровне составляют более 1,5 %, что значительно превышает критическое значение деформации. Особенность развития этих деформаций такова, что достижение ими максимума совпадает во времени с пребыванием металла ЗТВ (ТИХ-II) в интервале температур 1150...700 °С. Изучение кинетики изменения продольных временных напряжений показало, что основную роль играют продольные относительно направления сварки напряжения  $\sigma_{x,x}$ , высокие значения которых до  $0,8\sigma_{0,2}$  достигаются еще во время пребывания металла ЗТВ в области подсоли-



дусных температур, что подтверждает факт преимущественного образования поперечных околошовных трещин. На основе анализа показана корреляция между напряженно-деформированным состоянием и технологической прочностью, т. е. склонностью сварных соединений к образованию горячих трещин в процессе сварки и термической обработки никелевых высокопрочных сплавов.

Установлены методы управления напряженно-деформированным состоянием при сварке сплавов, склонных к образованию горячих трещин в ЗТВ и показано, что за счет варьирования уровнем тепловложения можно существенно задержать момент начала развития положительных приращений пластической деформации в ЗТВ и снизить их значения до уровня менее 0,1 %, что не превышает критических значений, при которых образуется трещина в соответствующем температурном интервале хрупкости.

Разработан комплекс рекомендаций для создания условий, при которых обеспечивается необходимая технологическая прочность сварных соединений.



**И. А. Петрик** (ОАО «Мотор Сич») защитил 10 октября 2007 г. кандидатскую диссертацию на тему «Процессы восстановления сваркой и пайкой лопаток газотурбинных двигателей из трудносвариваемых сплавов на основе никеля и титана».

Диссертация посвящена разработке промышленных технологических процессов восстановления лопаток из высокопрочных титановых и жаропрочных никелевых сплавов газоздушного тракта газотурбинных авиадвигателей с целью продления ресурса их работы. В работе рассмотрены и систематизированы основные причины выхода из строя деталей ГВТ ГТД. Показано, что при работе двигателя на лопатки воздействуют динамические силовые и температурные нагрузки и коррозионная среда газового потока. Распределение термических нагрузок неравномерно по телу лопатки и имеет градиентный характер. Проведена классификация возникающих эксплуатационных повреждений лопаток: по видам износа, по конструктивным признакам, по зонам возникновения, по причинам выхода из строя — с целью определения их ремонтпригодности и условий ремонта.

Приведены основные методологические аспекты работы, методы и использованное оборудование. В работе проводили химический, спектральный и рентгеноструктурный анализы, металлографические исследования, стандартные механи-

ческие испытания, испытания на кратковременную и длительную прочность, в том числе при рабочих температурах; определение предела выносливости  $\sigma_{-1}$  (на базе  $10^7$  циклов). Для эффективной технологической оценки свариваемости металла лопаток после их эксплуатации совместно с методом динамического деформирования TransVarestraint Test использовали методику технологической «лопаточной кольцевой» пробы.

Исследованы влияние режимов ЭЛС, АДС, состава присадочного материала и режимов термической обработки на структуру и механические свойства сварных соединений титанового сплава ВТЗ-1 и жаропрочного никелевого сплава ЖС6У-ВИ. Показано, что стандартные приемы и параметры ЭЛС и АДС, значительно снижают эксплуатационные свойства соединений и требуют оптимизации. На основании анализа установленных зависимостей влияния на структуру и свойства определены значения погонной энергии ЭЛС и АДС, при которых обеспечивается оптимальная технологичность структуры сварных швов и наиболее высокий уровень механических свойств.

Проведены расчет и анализ распределения рабочих напряжений в объеме лопатки. Расчет и графическое построение полей напряжений выполнен на примере рабочей лопатки вентилятора ГТД Д-36. На основе сравнения рабочих напряжений с прочностными свойствами ремонтных сварных соединений разработана методика определения зон возможного ремонта сваркой и предложена градиентно-прочностная модель выбора параметров технологий, материалов и методов обработки сварных соединений. Определяющей в назначении технологий ремонта признана свариваемость конструкционных материалов. Для рабочих лопаток из двухфазных титановых сплавов типа ВТЗ-1, обобщенным критерием свариваемости является показатель усталостной прочности, для ремонтных сварных и паяных соединений из ЖС6У-ВИ — уровень чувствительности к образованию трещин и прочностные свойства сварного соединения.

Применение градиентно-прочностного принципа ремонта для лопатки вентилятора из сплава ВТЗ-1 показал возможность расширения объема ремонта на 75...80 % в сравнении с допустимыми зонами, установленными согласно ранее принятой нормативной документации.

Представлены результаты и анализ свариваемости лопаток из жаропрочных никелевых сплавов способом АДС. Проведены исследования влияния присадочного материала из сплавов ВЖ98, ЭП367 и термообработки для лопаток из сплава ЖС6У-ВИ на технологическую прочность (устойчивость против образования трещин). Определено



наличие температурного интервала хрупкости сплава в диапазоне температур 950...1160 °С при низких значениях (0,1 %) критической деформации. Обоснованы и предложены режимы сварки и термообработки, технологические приемы их выполнения, которые снижают влияние термомеханических процессов при сварке сплава ЖС6У-ВИ на образование трещин. На основе стандартного метода Trans-Varestraint Test разработан экспресс-метод оценки свариваемости сложнотермически обработанного металла лопатки после длительной эксплуатации под влиянием высокотемпературной газовой среды и силовых нагрузок. Используется «кольцевая лопаточная проба», которая выполняется непосредственно на теле реальной лопатки. Предложен комплексный критерий оценки свариваемости  $\Omega$ , который учитывает конструктивные особенности детали и состояние металла, уровень напряженного состояния по местам расположения и суммарной длине трещин, что образуются.

В ряде случаев, когда ремонт лопаток методами сварки неприемлем, исследована возможность ремонта с применением пайки. Определены эксплуатационные дефекты по типу и месторасполо-

жению, которые могут быть исправлены методом пайки. Исследована возможность применения стандартизованных в авиационной промышленности припоев, определены условия получения капиллярных зазоров, необходимых для получения плотных и прочных ремонтных паяных соединений жаропрочных литейных никелевых сплавов.

Разработанный принцип градиентной прочности обоснован и реализован при создании технологий ремонта с применением сварки и сопутствующих технологий как титановых, так и жаропрочных сплавов.

Рекомендации и подходы реализованы также для ремонта дефектов литья при изготовлении новых сопловых лопаток.

Разработаны нормативная документация, инструкции, групповые техпроцессы и рекомендации на ремонт, которые согласованы с конструкторами-разработчиками двигателя.

Обеспечена методологическая и технологическая возможность для создания процессов ремонта нагруженных лопаток ГВТ в производственных условиях. Разработки внедрены на ОАО «Мотор Сич».

УДК 621.791(088.8)

## ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА\*

**Способ восстановления изношенных поверхностей стальных деталей**, отличающийся тем, что предварительно осуществляют электродуговую наплавку изношенной поверхности с учетом припуска на последующую механическую обработку, которую проводят с занижением номинального размера детали, затем осуществляют дробеструйную активацию обработанной поверхности, а газопламенное напыление осуществляют самофлюсующимся порошковым сплавом с последующим оплавлением нанесенного покрытия путем нагрева детали до температуры 950...1050 °С, причем покрытие наносят с превышением номинального размера детали на величину усадки покрытия после полного охлаждения детали. Патент РФ 2299115. М. М. Берзин, А. Н. Пурехов, С. А. Бульканов и др. [14].

**Устройство для ультразвукового лужения изделий**, отличающееся тем, что его открытый корпус помещен во внешний корпус с образованием воздушного зазора между их стенками, опора выполнена в виде расположенных друг за другом на разных расстояниях от ванны двух параллельных пластин, выполненных с возможностью расположения на их торцах ультразвукового преобразователя и введения наклонно его инструмента в припой, причем пластины закреплены в зазоре между корпусами на параллельных стенках внешнего корпуса наклонно по отношению ко дну ванны. Патент РФ 2299792. А. А. Новик (ООО «Ультразвуковая техника-инлаб») [15].

**Газосварочная горелка**, отличающаяся тем, что ее смеситель размещен в головке и сопряжен с мундштуком, входное отверстие кислорода смесителя сообщено с его камерой смешения через калиброванное отверстие, отношение диаметра к диаметру входного отверстия камеры смешения и к диаметру отверстия выходного участка ступенчатого отверстия мундштука составляет  $1:1,6 \div 3:1,63 \div 2,8$ , причем длина входного отверстия камеры смешения смесителя составляет 0,3–0,6 полной длины камеры смешения, а выходное отверстие камеры смешения смесителя и участок ступенчатого отверстия мундштука, расположенный перед выходным участком, имеют форму конусов, обращенных друг к другу основаниями с углами при вершине соответственно равными 12 и 8–18°. Патент РФ 2299793. Г. Л. Хачатрян, Ю. К. Родин, С. В. Соколов [15].

**Однофазный сварочный стабилизатор тока** содержит основной источник питания, состоящий из силового трансформатора с одной первичной обмоткой и двумя вторичными обмотками, подключенными через датчик тока к однофазному двухполупериодному выпрямителю на силовых тиристорах, к выходу которого подключены электроды сварочной дуги малоомощного трансформатора с первичной обмоткой, соединенной с выводами для подключения сети, и первой и второй вторичными обмотками. Приведены отличительные признаки. Патент РФ 2299794. В. Т. Тарасов [15].

**Устройство для электроконтактной приварки ферромагнитных порошков**, содержащее роликовый электрод, привод вращения детали, механизм прижатия электрода и механизм

\* Приведены сведения о патентах, опубликованных в бюллетенях РФ «Изобретения. Полезные модели» за 2007 г. (в квадратных скобках указан номер бюллетеня).



его перемещения, сварочный трансформатор, вторичная обмотка которого выполнена с возможностью подсоединения к электроду и детали, и дозирующий бункер порошка, отличающееся тем, что дозирующий бункер снабжен электромагнитным клапаном, обмотка которого параллельно подсоединена к вторичной обмотке сварочного трансформатора. Патент РФ 2299795. Р. Н. Сайфуллин, М. Н. Фархшатов (Башкирский государственный аграрный университет) [15].

**Состав сварочной проволоки** для сварки и наплавки изделий из низколегированных конструкционных сталей, отличающийся тем, что он дополнительно содержит никель, титан и азот при следующем соотношении компонентов, мас. %: 0,06...0,12 углерода; 0,2...0,8 кремния; 0,9...1,6 марганца; 0,05...0,3 ванадия; 0,005...0,009 кальция; не более 0,025 серы; не более 0,030 фосфора; не более 0,25 никеля; не более 0,05 титана; не более 0,012 азота; остальное железо. Патент РФ 2299796. А. В. Сурков, В. А. Стародубцев, В. В. Яковлев и др. (ОАО «Уралмашзавод») [15].

**Способ изготовления плакированной фольги**, включающий сборку пакета, состоящего из плакирующих планшет, размещенных с двух сторон слитка из алюминиевого сплава, нагрев пакета, горячую и холодную его многопроходную прокатку, отличающийся тем, что использует силуиновые планшеты, анизотропия деформационных свойств которых равна анизотропии деформационных свойств слитка, а холодную прокатку заканчивают при температуре  $(165 \pm 5)^\circ\text{C}$  с последующим охлаждением на воздухе. Патент РФ 2300450. В. Ю. Арынвский, Ф. В. Гречников, В. Р. Каргин (Самарский государственный аэрокосмический университет им. С. П. Королева) [16].

**Способ образования стыковых сварных швов на трубах при производстве трубных шпилек**, отличающийся тем, что предварительно сопрягаемые концы труб калибруют раздачей на конус, сборку труб осуществляют на втулке из плакирующего материала, установленной на оправке с контактом, кромок торцов втулки, с внутренними коническими поверхностями калиброванных участков, а после сварки ТИГ с присадкой горячий стык подвергают радиальному обжигу на оправке по схеме трехосного неравномерного сжатия с плакированием внутренней поверхности стыка при его окончательном формировании путем поперечных сдвиговых деформаций материала труб и присадочного материала относительно торцевых кромок втулки из плакирующего материала. Патент РФ 2300451. С. И. Козий, Г. А. Батраев, С. С. Козий (То же) [16].

**Порошковая проволока марки 48ПП-10Т для механизированной сварки хладостойких низколегированных сталей**, отличающаяся тем, что порошкообразная шихта дополнительно содержит диоксид титана, периклаз и никель, а комплексная лигатура содержит лантан, празеодим, церий, неодим и железо при следующем соотношении компонентов проволоки, мас. %: 4,21...7,32 диоксида титана; 0,50...1,50 полевого шпата; 0,21...0,71 электрокорунда; 0,20...0,50 натрия кремнефтористого; 0,35...0,65 ферросилиция; 1,20...3,10 ферромарганца; 0,7...1,4 никеля; 0,2...0,4 периклаза; 2,1...4,7 железного порошка; 0,22...0,83 комплексной лигатуры; остальное сталь оболочки. Патент РФ 2300452. В. А. Мальшевский, П. В. Мельников, Л. А. Березовская (ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей») [16].

**Способ контроля глубины проплавления при формировании стыкозамкового сварного соединения тонкостенной оболочки с заглушкой**, отличающийся тем, что сборку осуществляют, по крайней мере, с одним местным зазором в стыке, распространяющимся на всю его глубину и имею-

щим протяженность вдоль стыка не менее величины сварочной ванны в этом направлении и ширину, составляющую 0,2...0,4 толщины стенки оболочки, при этом сварку в зоне нахождения зазора осуществляют с уменьшенной теплоотдачей в заглушку, а наличие требуемой величины проплавления определяют по отсутствию недопустимых наружных дефектов сварного шва в зоне расположения зазора. Патент РФ 2301136. А. А. Кислицкий, В. И. Васильков, А. М. Лузин (ОАО «Новосибирский завод химконцентратов») [17].

**Способ электронно-лучевой сварки оболочки теплового элемента с заглушкой**, отличающийся тем, что сварку ведут с обеспечением структурных изменений в оболочке в зоне ее калибровки, при этом одновременно с выполнением сварного шва оболочку в зоне калибровки прижимают к поверхности посадочного места заглушки при помощи ограничивающего тепловложение устройства, торец которого располагают от стыка на расстоянии 0,8...2,5 ширины сварного шва. Патент РФ 2301137. А. А. Кислицкий (То же) [17].

**Устройство для сборки и сварки труб**, отличающееся тем, что оно дополнительно снабжено тягой, смонтированной ниже уровня рельсов, роликковые опоры для трубной заготовки выполнены приводными и поворотными, а тележки снабжены подъемными приводными транспортными роликами, при этом сварочные тележки, одна из которых снабжена приводом перемещения, а другая выполнена не приводной, связаны между собой упомянутой тягой, а для перемещения по рельсам каждая из них снабжена четырьмя парами катков, попарно связанными между собой, приводная тележка с одной стороны снабжена установленными с двух сторон от рельса у каждой пары катков направляющими боковыми роликами, ось вращения которых перпендикулярна оси вращения катков. Патент РФ 2301138. В. П. Коняев, Е. Н. Фоминых, Р. Н. Катырева и др. (ОАО «Электростальский завод тяжелого машиностроения») [17].

**Вакуумная термическая печь для пайки** давлением крупных металлических деталей, содержащая работающий под давлением корпус с цилиндрической стенкой и крышкой, размеры и расположение которой позволяют закрыть один конец цилиндрической стенки корпуса, расположенную в корпусе термоизолированную камеру, образующую зону нагрева, множество электрических нагревательных элементов, расположенных в термоизолированной камере в зоне нагрева, смонтированную на крышке корпуса систему манипулирования с опорой для обрабатываемой в печи металлической детали, состоящей из двух частей, между которыми внутри собранной из них детали остается свободное пространство, и первую вакуумную систему, которая соединена с корпусом и предназначена для создания разрежения внутри корпуса, включая зону нагрева. Патент РФ 2301727. У. Миттен, Л. Орин, У. Маквей (Инсен Интернешнл, Инк. США) [18].

**Способ вибродуговой сварки с подачей электродной проволоки**, отличающийся тем, что задают перемещение торца электродной проволоки различной амплитуды с помощью кривошипно-шатунного механизма со штоком устройства подачи электродной проволоки путем чередования импульсов его возвратно-поступательного движения, затем осуществляют процесс сварки при горении дуги, периодически возбуждаемой короткими замыканиями между электродной проволокой и деталью, возникающими под действием динамической силы при максимальной амплитуде колебаний торца проволоки. Приведены и другие отличительные признаки. Патент РФ 2301728. В. В. Бульчев, В. А. Дубровский, С. А. Голубина [18].



*SCHWEISSEN UND SCHNEIDEN (Германия) 2007. — № 5 (нем. яз.)*

**Hartman G. F.** Автомобильная промышленность ЕС на современном курсе роста, с. 228–229.

**В г. Бохум** открыт исследовательский институт «Новые материалы», с. 229–230.

**Сопоставление** успехов в области пайки соподнимающихся стран, с. 232–236.

**Индивидуальные смеси газов** оптимизируют лазерную сварку, с. 238–240.

**Защитная одежда** в качестве страхования сварщика, с. 240.

**Выставки-ярмарки** в Штутгарте «Экспо-лист» и «Schweisstec», с. 1–22.

**Mucklich S. et al.** Магний — смешанные соединения. Сравнительные исследования пайки, склеивания механического соединения, с. 243–248.

**Bobzin K. et al.** Высокотемпературная пайка — способ ремонта для повышения долговечности монокристаллических компонентов турбин, с. 249–252.

**Wilden J. et al.** Технологические аспекты промышленной диффузионной сварки деталей со сложным внутренним контуром, с. 253–259.

**Tillmann W. et al.** Свойства паяных соединений (на основе никеля) алмаза со сталью для обрабатывающего алмазы инструмента, с. 260–269.

**Dilthey U.** Гидродинамический анализ процесса при гибридной сварке (лазер + сварка плавящимся электродом в смеси защитных газов) Ч.1. Геометрия шва, с. 270–278.

**Защита человека** в электрических, магнитных и электромагнитных полях — правила, стандарты и директивы, с. 279.

*SCHWEISS-& PRUEFTECHNIK (Австрия) 2007. — № 4 (April) (нем. яз.)*

**Монтажные швы**, сваренные вольфрамовым электродом в инертном газе горячей проволокой на толстостенных высокопрочных трубопроводах диаметром от 2, 4 до 6,8 м для гидроаккумулирующих электростанций, с. 51–55.

**Более высокая производительность** при сварке порошковой проволокой, с. 57–58.

*SCHWEISS-& PRUEFTECHNIK (Австрия) 2007. — № 5 (Mai) (нем. яз.)*

**Hohenwarter J.** Визуальный контроль с точки зрения сварочной техники, с. 67–69.

**Межотраслевая конференция** подкомиссий SC XI-E и SC-XI-A, с. 69–72.

**2-я региональная конференция** Общества неразрушающего контроля в Линце, с. 73–74.

**35-я конференция** «Сварка в аппаратостроении и судостроении», с. 76–77.

*SUDURA (Румыния) 2007. — An. XVII, № 2 (рум. яз.)*

**Georgescu B., Georgescu V.** Исследование напряжений и деформаций при холодной сварке зубчатых поверхностей, с. 4–10.

**Safta V. I.** Влияние параметров сварки на эффективную мощность процесса импульсной сварки МИГ сплава AlMg-Si<sub>0,5</sub>, с. 11–15.

**Mitelea I., Mosila A.** Исследования сварки трением компонентов из разнородных рафинированно науглероженных сталей, с. 16–23.

**Hackl H.** Новые перспективы сварки МИГ-МАГ с переносом холодного металла — обеспечение чистой поверх-

\* Раздел подготовлен сотрудниками научной библиотеки ИЭС им. Е. О. Патона. Более полно библиография представлена в Сигнальной информации (СИ) «Сварка и родственные технологии», издаваемой в ИЭС и распространяемой по заявкам (заказ по тел. (044) 287-07-77, НТБ ИЭС).



ности кромок и технико-экономические преимущества, с. 24–27.

**Shackleton D. N., von Hofe D.** Обеспечение качества при сварке, с. 30–34.

*TRANSACTION of JWRI (Япония) 2006. — Vol. 35, № 2 (англ. яз.)*

**Nobuyuki A. et al.** Модификация поверхности алюминиевых покрытий, напыленных с помощью процесса переплава диодным лазером, с. 1–4.

**Kobayashi A. et al.** Основные характеристики плазменного источника типа микровольнового разряда, работающего при атмосферном давлении, с. 5–9.

**Morks M. F., Kobayashi A.** Получение и определение характеристик покрытий из  $\text{HA/SiO}_2$ , выполненных напылением газоразрядной плазмой туннельного типа, с. 11–16.

**Kobayashi A. et al.** Влияние отжига на композиционное покрытие из диоксида циркония/оксида алюминия, полученное напылением газоразрядной плазмой туннельного типа, с. 17–21.

**Kobayashi A.** Свойства стеклянных покрытий на основе железа, напыленных газоразрядной плазмой туннельного типа, с. 23–28.

**Kobayashi A. et al.** Прочность сцепления пленки DLC с покрытием из диоксида циркония, полученным напылением газоразрядной плазмой туннельного типа, с. 29–34.

**Fahim F. N., Kobayashi A.** Микроструктура, механические и термические свойства композиционного покрытия

**Badescu P.** Ремонт с помощью сварки компонентов кислородного конвертора, с. 34–40.

**Winkler F., Hauzenberger R.** Поставка в Гану роторов турбин гидроэлектростанции, сваренных австрийской фирмой Boehler, с. 41.

с металлической основой  $\text{W/SiC}$ , полученного плазменным напылением, с. 35–41.

**Radwan M., Miyamoto Yo.** Самораспространяющийся высокотемпературный синтез наноструктур  $\text{AlN}$  и их свойства при спекании, с. 43–46.

**Kondoh K., Watanabe R.** Анализ характеристик горячего прессования частиц порошка железа с помощью уравнения Купера–Итона, с. 47–51.

**Nishikawa H. et al.** Прочность соединения между бесвинцовым припоем на основе  $\text{Sn-Ag}$  и медной подкладкой и оценка влияния добавки меди в припой, с. 53–56.

**Hirohata M., Kim You-Chul.** Характеристики механических свойств при сжимающих нагрузках крестообразных колонн выступающих панелей, подверженных правке нагревом, с. 57–62.

**Kondo A. et al.** Механохимический синтез  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{BaCO}_3$ , с. 63–65.

**Shibayanagi T. et al.** Местная рекристаллизационная обработка чистого алюминия с помощью точечного лазерного нагрева, с. 67–68.

*WELDING JOURNAL (США) 2007. — Vol. 86, № 5 (англ. яз.)*

**Ozden H.** Исследуемые волоконные лазеры для применения в судостроении и морских конструкциях, с. 26–29.

**Stahura R., Houska C.** Новейшие достижения в области сварки нержавеющей стали, с. 30–35.

**Schlueter H.** Лазерная сварка — преимущества, концепция и применение, с. 37–39.

**Messier Jr. R. W.** Электронно-лучевая сварка в производстве сверхзвуковых самолетов F-14, с. 41–47.

**Nowotny S. et al.** Прогрессивная лазерная технология, используемая для наплавки и плакировки, с. 48–51.

**Longfield N. et al.** Повышение производительности лазерной сварки, с. 52–55.

**Campbell R. D.** Как избежать дефектов в сварных швах на нержавеющей стали, с. 56–63.

**Chi C. et al.** Оптимальная оценка толстолистовых деталей из AZ61A-F, свариваемых электронно-лучевым способом, с. 113–118.

**Aizawa T. et al.** Применение магнитно-импульсной сварки для соединений из сплавов алюминия и толстолистовой стали, с. 119–124.

**Ramirez J. E.** Оценка свариваемости сверхмартенситных нержавеющей трубных сталей, с. 125–134.

**Kanjilal P. et al.** Прогнозирование переноса элементов при дуговой сварке под флюсом, с. 135–146.

#### ПЕРЕВОДЫ

**Аттестация гибридной сварки Nd: YAG- и  $\text{CO}_2$ -лазером + плазмой с использованием присадочного материала в виде порошка:** Пер. ИЭС им. Е. О. Патона. — К., 2006. — 5 с. // Пер. ст. Штеллинг К. и др. из журн. «Schweissen & Schneiden». — 2006. — Vol. 58, № 9. — S. 460–465.

**Гибридная сварка (лазерная и импульсная МИГ на переменном токе) тонколистовых алюминиевых сплавов:** Пер. ИЭС им. Е. О. Патона. — К., 2004. — 30 с. // Пер. ст. Уэяма Т. и др. из журн. «J. of Light Metal Weld. & Constr.». — 2003. — Vol. 41, № 12. — P. 9–36.

**Добавленная стоимость за счет сварочной техники:** Пер. ИЭС им. Е. О. Патона. — К., 2006. — 2 с. // Пер. ст. из журн. «Schweissen & Schneiden». — 2005. — Спец. вып. — S. 36.

**Измельчение структуры ЗТВ на стали  $\text{CrMoV}$ :** Пер. ИЭС им. Е. О. Патона. — К., 2005. — 15 с. // Пер. ст. Чью Б. и др. из журн. «Metal Construction». — 1979. — № 5.

**Концепция ремонта стальных кузовов ручными лазерными системами:** Пер. ИЭС им. Е. О. Патона. — К., 2006. — 11 с. // Пер. ст. Эдесе Б. и др. из DVS 237. — 2005. — 11 с.

**Неразрушающий контроль сложных объемных сварных соединений:** Пер. ИЭС им. Е. О. Патона. — К., 2006. — 8 с. // Пер. ст. Лангрок С. и др. из DVS 237. — 2005. — 8 с.

**Приоритеты в области исследований и разработок ИСИМ:** Пер. ИЭС им. Е. О. Патона. — К., 2005. — 8 с. // Пер. ст. Фарбас Н. — из журн. «Suduga». — 2002. — № 1. — P. 3.

**Производство труб большого диаметра для кислых газов с точки зрения сварки:** Пер. ИЭС им. Е. О. Патона. — К., 2006. — 8 с. // Пер. ст. Берг Б. и др. из DVS 237. — 2005. — 8 с.

**Разработка припоев для соединения алюминидов титана и никеля:** Пер. ИЭС им. Е. О. Патона. — К., 2005. — 6 с. // Пер. DVS 231. — 2004. — 6 с.

**Сварочные явления при гибридной сварке ИАГ лазером и дугой ТИГ:** Пер. ИЭС им. Е. О. Патона. — К., 2006. — 25 с. // Пер. ст. Наито Я. и др. из журн. «Quarterly J. of the Jap. Welding Society». — 2006. — Vol. 24, № 1. — P. 32–51.

**Сварка и соединение — ключевые технологии будущего:** Пер. ИЭС им. Е. О. Патона. — К., 2005. — 28 с. // Пер. ст. Дилтай У. и др. из журн. «BID-ISIM». — 2006. — № 2. — P. 13.



## МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОСФЕРА XXI ВЕКА»

17–22 сентября 2007 г. в Севастополе прошла Международная научно-техническая конференция «Машиностроение и техносфера XXI века». Ее организаторами выступили Министерство образования и науки Украины, Донецкая областная и городская администрация, Международный союз машиностроителей, Фонд поддержки прогрессивных реформ, Национальная металлургическая академия Украины (НИИСТ), Донецкий и Севастопольский национальные технические университеты, Брянский государственный технический университет, Московский государственный университет инженерной экологии, Таганрогский государственный радиотехнический университет, Азербайджанский, Жешувский, Островский, Силезский, Ясский технические университеты, Технический университет Молдовы, Магдебургский, Портсмутский, Тульский университеты, Бухарестская военно-техническая академия, Институт международного сотрудничества, Российско-Украинский университет, Донецкий институт холодильной техники, Ассоциация металловедов и термистов Украины, Научно-технический союз машиностроения Болгарии, Научный центр проблем механики машин НАН Беларуси, издательство «Машиностроение», Брянский АО НИИ «Изотерм», ОАО «ДЗГА», АО «НОРД», ЗАО «НКМЗ», ОАО «Точмаш», НПП «Эталон», ЧП «Технополис», Снежнянский машзавод.

Конференция является традиционной и проводится уже в четырнадцатый раз, привлекая к участию ученых разных стран: Беларуси, Грузии, Латвии, Литвы, Молдовы, России, Туркменистана, Украины, Армении, Узбекистана, Казахстана, Болгарии, Франции, Германии, Польши, Румынии, Словакии, Чехии, Сирии и др.

Основные направления работы конференции:

создание и применение прогрессивных нетрадиционных и специальных технологий;

проблемы создания прогрессивного оборудования, механизации и автоматизации производственных процессов;

САПР. Решение вопросов комплексной автоматизации, подготовки и управления современными предприятиями;

создание и применение прогрессивных инструментов;

проблемы инженерии поверхностного слоя изделий. Вопросы триботехники, трения, смазки и износа;

проблемы создания современных инженерных материалов, совершенствование изделий машиностроения за счет нанесения покрытий;

моделирование и расчет сложных технических систем и технологических процессов;

проблемы инженерного образования.

Всего в работе конференции приняли участие 286 представителей вузов, ведущих научных организаций, предприятий, фирм, конструкторский бюро. На заседаниях 11 секций было заслушано 366 докладов и сообщений.

Состоялся обмен научно-технической информацией. Были обсуждены перспективные пути создания и развития новой техники и технологий, выявлены возможности реализации качественно новой совокупности свойств и меры полезности изделий, разработки совместных научных программ, установлении деловых контактов и коммерческих связей в данной области.

К началу работы конференции был издан шеститомный сборник материалов конференции общим объемом около 2000 страниц, содержащий материалы 380 докладов 758 авторов, в числе которых 197 доктора и 412 кандидатов наук. Авторы представляют 140 организаций из 98 городов Украины, России, Беларуси и других стран ближнего и дальнего зарубежья. Среди них АО «НКМЗ», ИЭС им. Е. О. Патона, «КМЗ», ОАО «Мотор Сич», ЗАО «Группа Норд», НПП «Эталон», АКХЗ (г. Авдеевка), СибАДИ (г. Омск), ООО «ТСС-Тяжстанкосервис» (г. Краматорск, Украина), ОАО «Белкард» (г. Гродно), ЗАО «ПИРС» (г. Москва, Россия), ГП НПКГ «Зоря-Машпроект» (г. Николаев, Украина), ЗАО «МЛЗ» (г. Макеевка, Украина), СЗАО «ФИДМАШ» (г. Минск, Беларусь) и др.

Г. К. Харченко, д-р техн. наук



## НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ!

### Н. М. ВОРОПАЮ — 70



В **ноябре** исполнилось 70 лет известному ученому в области сварки, доктору технических наук, ведущему научному сотруднику ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины Николаю Марковичу Воропаю. Его трудовая деятельность началась после окончания в 1959 г. Киевского политехнического института по специальности «Оборудование и

технология сварочного производства». В качестве молодого специалиста Н. М. Воропай был направлен на Харьковский завод «Электротяжмаш», где работал в должности инженера, старшего инженера и заведующего сварочной лабораторией завода. В 1963 г. Николай Маркович поступил в аспирантуру при ИЭС им. Е. О. Патона, которую закончил в 1966 г. с успешной защитой кандидатской диссертации. В дальнейшем его работа неразрывно связана с ИЭС им. Е. О. Патона, в котором он прошел путь от младшего научного сотрудника до заведующего научным отделом «Новых процессов механизированной дуговой сварки в защитных газах». В 1982 г. Н. М. Воропай защитил докторскую диссертацию, а в 1998 г. переведен на должность ведущего сотрудника отдела № 37 института.

За период трудовой деятельности в ИЭС им. Е. О. Патона Н. М. Воропай теоретически и экспериментально развил научные основы процессов механизированной дуговой и плазменной сварки. Им предложены магнитогидродинамические методы моделирования каплеобразования и переноса электродного металла, проплавления основного металла и формирования швов. Он создал ряд эффективных приемов управления характеристиками дуги с плавящимся и неплавящимся электродом. Разработал

технологии аргодуговой и микроплазменной сварки разнополярными импульсами тока, сварку с программированием скорости подачи электродной проволоки и модуляцией сварочного тока. Результаты выполненных исследований явились базой для разработки процессов механизированной дуговой сварки активированным плавящимся электродом. Решены важные практические задачи по совершенствованию технологии и оборудования электролитно-плазменной обработки поверхности сварочной проволоки. С непосредственным участием Н. М. Воропая перечисленные способы сварки нашли применение в машиностроении, судостроении, стройиндустрии и других отраслях. За создание и внедрение в производство микроплазменной сварки для изготовления уникальных сотовых металлоконструкций систем противоракетной обороны Н. М. Воропаю в составе авторского коллектива в 1972 г. присуждена Государственная премия УССР в области науки и техники.

В настоящее время Н. М. Воропай ведет исследования комбинированных и гибридных процессов плазменно-дуговой сварки. Под его руководством в творческом содружестве с Каховским заводом электросварочного оборудования и Симферопольским электромашиностроительным заводом испытаны технологические свойства и расширены функциональные возможности серийных сварочных полуавтоматов и источников питания.

По выполненным работам Н. М. Воропай подготовил и опубликовал две книги и 210 научных статей, получил 75 авторских свидетельств и 12 зарубежных патентов. В 1985–1995 гг. был Председателем государственной экзаменационной комиссии сварочного факультета НТУУ «КПИ». С 1985 г. по настоящее время является членом редколлегии журнала «Автоматическая сварка».

### П. В. ГЛАДКОМУ — 70



В **ноябре** исполнилось 70 лет бывшему руководителю отдела физико-металлургических процессов наплавки жаропрочных и коррозионностойких сталей ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины кандидату технических наук Петру Васильевичу Гладкому. Вся его трудовая деятельность

была неразрывно связана с Институтом электросварки им. Е. О. Патона, в который он поступил на работу в 1960 г. после окончания сварочного факультета Киевского политехнического института.

За тридцать семь лет работы в институте П. В. Гладкий прошел путь от инженера до руководителя одного из ведущих отделов. Многогранная образованность, большая работоспособность, целеустремленность и организованность, талант исследователя и инженера позволили ему добиться больших ус-

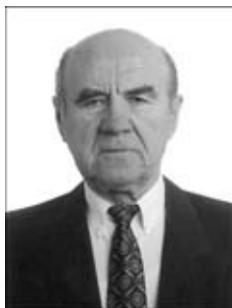
пехов в разработке и промышленном освоении новых технологий наплавки, наплавочного оборудования и материалов. Возглавляя отдел наплавки с 1984 по 1997 гг., он достойно продолжил дело своего учителя — Исидора Ильича Фрумина. За эти годы под руководством П. В. Гладкого были выполнены работы по дуговой наплавке роликов МНЛЗ на Череповецком металлургическом комбинате, по электрошлаковой наплавке лентами энергетического и нефтехимического оборудования, дуговой и электрошлаковой наплавке инструментов для горячего деформирования металла и многое другое.

Особенно значителен вклад П. В. Гладкого в области плазменно-порошковой наплавки, становление и развитие которой в бывшем СССР в большой

мере связано с его именем. Работы П. В. Гладкого с сотрудниками актуальны и сегодня, в настоящее время на многих предприятиях Украины и России плазменно-порошковым методом наплавляются детали нефтехимической, энергетической и общепромышленной запорной арматуры, клапаны различных двигателей внутреннего сгорания и многие другие детали.

Ему принадлежат глубокие исследования теплофизических характеристик плазменной дуги и сварочной ванны при плазменно-порошковой наплавке, а также движения и нагрева присадочного порошка в плазменной дуге. Результаты этих исследований были опубликованы в ряде статей и монографии «Плазменная наплавка», вышедшей в свет в 2007 г.

## Б. Н. КУШНИРЕНКО — 80



Исполнилось 80 лет бывшему директору Экспериментального производства ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, кандидату технических наук, заслуженному машиностроителю Украины Борису Николаевичу Кушниренко.

Весь трудовой путь юбиляра после его участия в боевых действиях на Балтийском флоте, дальнейшей морской службы по 1951 г., учебы в Киевском политехническом институте был связан с Институтом электросварки им. Е. О. Патона. До 1972 г. он занимался исследованиями свариваемости высокопрочных сталей и разработкой технологии сварки конструкций ракетной техники. Им было опубликовано по этой тематике более 30 научных работ. К наиболее весомым работам Б. Н. Кушниренко можно отнести разработанные им новые способы аргонодуговой сварки с поперечными перемещениями дуги. По этой технологии на протяжении 40 лет и по настоящее время изготавливают большинство твердотопливных ракетных двигателей из сверхпрочных сталей. Им была разработана технология сварки с активированными флюсами соединений из сверхпрочных мартенситных сталей обычной выплавки, а также рафи-

нированных электронно-лучевым, электрошлаковым и плазменно-дуговым перепадами.

Работая с 1972 г. директором ЭП ИЭС им. Е. О. Патона Б. Н. Кушниренко обеспечил в относительно короткий срок строительство и ввод в эксплуатацию нового производственного корпуса. Это позволило во много раз увеличить объем услуг, оказываемых научным отделам института. В тесном сотрудничестве с учеными института ЭП изготавливало образцы электросварочных машин для эксплуатации их в различных условиях, в том числе под водой и в космосе. Ежегодно более чем 600 т новых опытных материалов для сварки (электроды, порошковые проволоки и ленты, флюсы, порошки для покрытий) изготавливались в ЭП и отправлялись в более чем 350 предприятий Украины и за рубеж. Около 400 новых опытных узлов и оборудования, 200 электроприборов, несколько тысяч деталей и образцов для испытаний сварных швов ежегодно изготавливалось ЭП для научных подразделений института. Производственную деятельность Б. Н. Кушниренко совмещает с научной и в период 1972-1993 гг. публикует 8 научных статей и получает 25 авторских свидетельств. В 1981 г. Б. Н. Кушниренко была присуждена Премия Совета Министров СССР. В 1986 г. ему присвоено почетное звание «Заслуженный машиностроитель Украинской ССР».

**Сердечно поздравляем юбиляров, желаем им крепкого здоровья, долгих лет плодотворной работы и новых творческих успехов.**

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

15 лет на рынке сварочного оборудования Украины

**предприятие «Трида-Сварка»**  
г. Запорожье

- Электрогазосварочное оборудование
- Горелки к полуавтоматам
- Электрододержатели
- Пусконаладочные работы
- Ремонт сварочного оборудования, в том числе сложного
- Технологическое обеспечение сварочных процессов
- Автоматизированные сварочные линии и комплексы
- Проволока алюминиевая марки Al Mg 5  $\varnothing$  1,2 мм, Al Si 5  $\varnothing$  1,2 мм






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

Электромашино-строительный завод «ФИРМА СЭЛМА» 

**ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОСВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**



95000, г. Симферополь, Украина  
 ул. Генерала Васильева, 32А  
 Тел.: (0652) 58-30-55, 66-85-37,  
 58-30-50, 58-30-52, 58-30-54  
 E-mail: sales@selma.crimea.ua  
**[www.selma.ua](http://www.selma.ua)**



маски  
 катоды  
 флюсы  
 горелки  
 редуктора  
 проволоки  
 электроды  
 выпрямители  
 плазмотроны  
 клеммы массы  
 трансформаторы  
 сварочные трактора  
 керамические сопла  
 держатели электрода  
 сварочные полуавтоматы  
 установки для автоматизированной плазменной резки  
 оборудование для газоплазменной резки, наплавки, напыления  
 установки для контактной сварки  
 установки для микроплазменной сварки  
 гарантийное и сервисное обслуживание  
 установки очистки и фильтрации воздуха  
 установки для автоматической сварки в среде защитных газов всех видов металла  
 оборудование для антикоррозионной защиты  
 установки для автоматической сварки под флюсом  
 композиционные металлополимерные материалы



03680, г. Киев, Украина, пр-т Глушкова, 1, пав.№21,  
 тел./факс: (+380 44) 526-93-70, 526-93-76, 526-93-75, 526-92-20,  
 e-mail: house@welding.kiev.ua, eduardch@ukr.net



**ООО "НПФ "Элно"**  
Порошковые проволоки  
для сварки, наплавки  
и напыления



ООО "НПФ "Элно" является представителем компании WELDING WIRE CO., LTD (Япония) и HYUNDAI WELDING (Южная Корея) в Украине



ул. Петропольська, 69, г. Киев, 03680 тел. (044) 200-80-25, 200-85-17 факс (044) 200-85-17 e-mail: info@elno.com.ua



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

Производство материалов для дуговой сварки, наплавки и резки:

**Электроды** – АНО-4, АНО-4П, 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, ТМЛ-1У, ТМЛ-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-НнХ25Г14НЗТ, 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, г.Киев-112, ул. О.Телиги, 2**      **Тел.: (044) 456-64-95; 456-63-69**  
**Факс: (044) 456-64-95; 456-63-08**



**ДОНМЕТ**  
Завод автогенного оборудования

Запоріжжя	(061) 224-11-56
Київ	(044) 200-80-67
Дніпропетровськ	(056) 370-54-45
Донецьк	(062) 381-88-93
Харків	(0572) 50-16-89
Луганськ	(0642) 595-165
Львів	(0322) 45-00-68
Полтава	(0532) 50-89-67
Вінниця	(0432) 53-16-38
Сімферополь	(0652) 54-32-11
Черкаси	(0472) 64-35-28



(06264) 5-77-13, 4-26-85  
svarka@donmet.com.ua    www.donmet.com.ua

Лидер производства порошковых проволок в Украине



**ООО "ТМ.ВЕЛТЕК"**

Порошковые проволоки для наплавки по ГОСТ 26101-84  
-80X20 P3T,35B9X3CF,25X5ФМС,18X1Г1М и др.

Порошковые проволоки ВЕЛТЕК  
-ВЕЛТЕК H200 - H620

Порошковые проволоки для сварки  
-АН1,АН8,АН39,АНЧ-2 и др.

Порошковые проволоки ТМВ  
-ТМВ3,ТМВ6,ТМВ7,ТМВ11,ТМВ14,ТМВ29 и др

Диаметры от 1,0 до 6,0 мм., производство до 5000 т/год  
разработка, адаптация к условиям заказчика.

ул. Полевая, 24, офис 504  
03056, Киев, Украина  
тел./факс: (044) 456-0209, (044) 458-3485  
e-mail: weldtec@iptelecom.net.ua    www.weldtec.com.ua



**ООО «ЦЕНТР ПРОМЫШЛЕННОЙ  
ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ»**

Предоставляет качественно и в полном объеме на территории Украины следующие услуги:

- контроль качества сварных соединений РГК, УЭК, ВИК, ЦД, МПД, герметичность, стилокопирование, замер твердости, механические испытания и лабораторные исследования;
- термообработка сварных соединений радиационным и индукционным методом;
- геодезическое обеспечение монтажно-строительных работ;
- аттестация персонала по контролю качества сварных соединений на АЭС.

«Центр» имеет все разрешительные документы и лицензии, необходимые для предоставления данных услуг на объектах НАЭК — Энергоатом и Госнадзорохрантруда.

Тел.: 501 31 26; тел./факс: 566 84 33  
Моб. тел.: (8 050) 334 82 46; (8 050) 334 82 24

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 металлческий

Комплексные раскислители и модификаторы

ул. Кургантокая, 1  
г. Днепропетровск  
49051, Украина

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

**производство продажа  
сервисное обслуживание**



*малозабаритное,  
высокоэффективное  
энергосберегающее сварочное  
оборудование на токи  
110-300 А с ограничением  
холостого хода до 12 В*



*автономные мобильные  
сварочные комплексы на базе  
резонансных преобразователей*



*сварочные инверторы для  
ММА и ТИГ сварки  
на токи до 300 А*

**"ИЭС-ЭПИС"**

Украина, 03150 г. Киев  
ул. Горького, 56, корп. 2  
Тел.: (044) 271-2036  
Факс: (044) 271-2102

**НАВКО-  
ТЕХ**

Automatic machines and robots for arc welding

**Автоматические установки и роботы  
для дуговой сварки**



УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ  
ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ШВОВ

УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ  
КОЛЬЦЕВЫХ ШВОВ

РОБОТТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ СВАРКИ

СВАРОЧНАЯ АППАРАТУРА



Украина, 03056, Киев, ул. Полевая, 24  
Тел.: +38 044 456-40-20  
Факс: +38 044 456-83-53

<http://www.navko-teh.kiev.ua>

E-mail: [info@navko-teh.kiev.ua](mailto:info@navko-teh.kiev.ua)



**MEGAFIL®**  
СТАБИЛЬНОСТЬ ФОРМЫ

MEGAFIL® — обеспечение точности благодаря совершенной форме: полностью бесшовная порошковая проволока с уникальными сварочными свойствами для получения неразъемных соединений; благодаря своим стабильным размерам, отсутствию деформаций кручения она пригодна при решении широкого круга задач; гарантированная внутренняя защита от влаги позволяет использовать ее без повторной прокатки; важными преимуществами являются сверхвысокая электрическая проводимость и стабильное горение дуги. Поддержите свою форму с помощью MEGAFIL®.

MEGAFIL®: Продукция компании Дратцуг Штайн — наша серия бесшовных изделий, включая также высококачественные порошковые проволоки TOPCORE® и MECUFIL®.

  
**DRAHTZUG STEIN**  
wire & welding

Drahtzug Stein  
D-67317 Altleiningen  
Tel: +49(0) 6356 966-0  
Fax: +49(0) 6356 966-114  
E-mail: [postmaster@drahtzug.de](mailto:postmaster@drahtzug.de); [www.drahtzug.de](http://www.drahtzug.de)

Официальный представитель в Украине

АРКСЭЛ

83017, г. Донецк, пер. Вирсаний, 2а

Тел.: (062) 332-2650(52)

Тел./факс: 382-9449, 332-2651

E-mail: [info@arsel.dn.ua](mailto:info@arsel.dn.ua); [www.arsel.dn.ua](http://www.arsel.dn.ua)



## ПОДПИСКА — 2008 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
	180 грн.	360 грн.	1980 руб.	3960 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.

**Контакты: тел.: (38044) 287-63-02, 271-24-03; факс: (38044) 528-34-84, 528-04-86, 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 (190×190 мм) - 500 \$

Вторая страница обложки (200×290 мм) 350 \$

Третья страница обложки (200×290 мм) - 350 \$

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

### Обложка внутренняя, полноцветная

Первая страница обложки (190×190 мм) - 350 \$

Вторая страница обложки (200×290 мм) 350 \$

Третья страница обложки (200×290 мм) - 350 \$

Четвертая страница обложки (200×290 мм) - 350 \$

### Внутренняя вставка

Полноцветная (200×290 мм) - 300 \$

Полноцветная (разворот А3) (400×290 мм) - 500 \$

Полноцветная (200×145 мм) - 150 \$

Полноцветная (80×80 мм) - 20 \$

• 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 200×290 мм

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

• Все файлы в формате IBM PC

• Corell Draw, версия до 10.0

• Adobe Photoshop, версия до 7.0

• QuarkXPress, версия до 7.0

• Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

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

Подписано к печати 24.10.2007. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 7,8. Усл. кр.-отт. 8,3. Уч.-изд. л. 8,9 + 2 цв. вклейки.

Цена договорная.

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

© Автоматическая сварка, 2007