

# Ежемесячный научно-технический и производственный журнал



№ 12 (597)  
Декабрь 2002

Издается с марта 1948 года

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

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор  
**Б. Е. ПАТОН**

Ю. С. Борисов, Н. М. Воропай,  
В. Ф. Грабин, В. Н. Замков,  
А. Т. Зельниченко, А. Я. Ищенко,  
С. И. Кучук-Яценко, Ю. Н. Ланкин,  
В. К. Лебедев (зам. гл. ред.),  
В. Н. Липодиев (зам. гл. ред.),  
Л. М. Лобанов, А. А. Мазур,  
В. И. Махненко, Л. И. Миходуй,  
Л. П. Мойсюк, В. Ф. Мошкин,  
О. К. Назаренко, В. В. Пешков,  
И. К. Походня, И. А. Рябцев,  
Ю. А. Стеренбоген,  
Б. В. Хитровская (отв. секр.),  
В. Ф. Хорунов, В. К. Шелег, К. А. Ющенко

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

И. Апата (Япония), Н. П. Алешин (Россия),  
И. Гринвик (Словакия),  
У. Дилтей (Германия),  
Е. А. Дорошевич (Беларусь),  
П. Зайфарт (Германия),  
А. С. Зубченко (Россия),  
К. Иноуэ (Япония), К. Мацубути (США),  
Н. И. Никифоров (Россия),  
Б. Е. Патон (Украина),  
Я. Пилиярчик (Польша)

## Адрес редакции:

03680, Украина, г. Киев-150,  
ул. Баженко, 11

Институт электросварки  
им. Е. О. Патона НАН Украины  
Тел.: (044) 227 63 02, 269 26 23

Факс: (044) 268 04 86

E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/rwj

Редакторы:

Е. Н. Казарова, В. И. Котляр,  
Т. В. Юштина

## Электронная верстка:

И. С. Баташева, И. Р. Наумова,  
И. В. Петушков, Т. Ю. Снегирева

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 «Автоматическая сварка» обязательна

За содержание рекламных материалов  
редакция журнала ответственности не  
несет

Цена договорная

## СОДЕРЖАНИЕ

### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Патон Б. Е., Булацев А. Р., Гавриш С. С., Загребельный А. А., Павлова С. В., Шулым В. Ф. Сварочные технологии в экстремальных условиях. Ч. 2. Степень риска и возможности его снижения .....	3
Маркашова Л. И., Добрушин Л. Д., Арсенюк В. В. Улучшение свариваемости при плакировании взрывом высокопрочных алюминиевых сплавов .....	14
Коротынский А. Е., Махлин Н. М., Богдановский В. А. К расчету электронных регуляторов сварочного тока для многопостовых сварочных систем .....	19
МакКеон Д., Дэдсон Дж. Р. Британский институт сварки сегодня .....	28

### 40 ЛЕТ ОТДЕЛУ СВАРКИ ЛЕГКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА

Ищенко А. Я. Исследования и разработки технологии сварки легких сплавов в ИЭС им. Е. О. Патона .....	30
Довбищенко И. В., Стебловский Б. А. Развитие способов дуговой сварки алюминия и его сплавов .....	32
Воропай Н. М. Распределение скорости и давления плазменных потоков в сварочных дугах .....	37
Ищенко А. Я., Довбищенко И. В., Машин В. С., Пашуля М. П. Особенности сварки алюминиевых сплавов плавящимся электродом в неоне и его смесях с гелием и аргоном .....	41
Покляцкий А. Г., Лозовская А. В., Гринюк А. А. Предотвращение образования оксидных плен в швах при сварке литийсодержащих алюминиевых сплавов .....	45
Скорина Н. В., Машин В. С. Покрытые электроды марки УНА для сварки и наплавки алюминия и его сплавов .....	49
Воропай Н. М., Мишенков В. А. Комбинированный способ плазменной и дуговой сварки разнополярными импульсами тока («гидра-процесс») .....	52

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Тараравичкин И. А. Методика определения корректирующих действий при статистическом регулировании сварочных процессов .....	54
Хорунов В. Ф., Сабадаш О. М., Максимова С. В., Стефанов Б. В. Дисперсно-упрочненный теплостойкий припой для низко- температурной пайки .....	56
По зарубежным журналам .....	58

### ХРОНИКА

Международная специализированная выставка «Станкомаш ЭКСПО 2002» .....	60
К 90-летию со дня рождения Д. М. Рабкина .....	61
К 90-летию со дня рождения И. И. Фрумина .....	62
Наши соболезнования .....	63
Указатель статей за 2002 г. ....	64
Указатель авторов .....	68
Учебные программы 2003 г. ....	70

### РЕКЛАМА

#### ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:



Каховский завод электросварочного оборудования



ПИИ Бинцель Украина ГмбХ



Ново-Краматорский  
машиностроительный завод



СП «ТМ ВЕЛДТЕК»

ОАО «Фирма СЭЛМА»

# Avtomicheskaya SVARKA

№ 12 (597)  
December 2002

Published since March, 1948

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

## EDITORIAL BOARD:

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

Yu.S.Borisov, N.M.Voropai,  
V.F.Grabin, V.N.Zamkov,  
A.T.Zelnichenko, A.Ya.Ishchenko,  
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, L.I.Mikhoduj  
L.P.Mojsov,  
V.F.Moshkin, O.K.Nazarenko,  
V.V.Peshkov, I.K.Pokhodnya,  
I.A.Ryabtsev, Yu.A.Sternenbogen,  
B.V.Khitrovskaya (exec. secr.),  
V.F.Khorunov,  
V.K.Sheleg, K.A.Yushchenko

## THE INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL:

I.Arata (Japan),  
N.P.Alyoshin (Russia),  
I.Hrivenak (Slovakia),  
U.Diltey (Germany),  
E.A.Doroshkevich (Belarus),  
P.Seyffarth (Germany),  
A.S.Zubchenko (Russia),  
K.Inoue (Japan),  
K.Masubuchi (USA),  
N.I.Nikiforov (Russia),  
B.E.Paton (Ukraine),  
Ya.Pilyarchik (Poland)

## Address:

The E. O. Paton Electric  
Welding Institute  
of the NAS of Ukraine,  
11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine  
Tel.: (38044) 227 63 02, 269 26 23  
Fax: (38044) 268 04 86  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj

## Editors:

E.N.Kazarova, V.I.Kotlyar,  
T.V.Yushtina

## Electron gallery:

I.S.Batasheva, I.R.Naumova,  
I.V.Petushkov, T.Yu.Snegireva,  
L.N.Gerasimenco

## CONTENTS

### SCIENTIFIC AND TECHNICAL

<b>Paton B.E., Bulatsev A.R., Gavrish S.S., Zagrebelyn A.A., Pavlova S.V., Shulym V.F.</b> Welding technologies in extreme conditions. P.2. Degree of risk and possibilities for alleviating it .....	3
<b>Markashova L.I., Dobrushin L.D., Arsenyuk V.V.</b> Improvement of weldability in cladding high-strength aluminium alloys by explosion welding .....	14
<b>Korotynsky A.E., Makhlin N.M., Bogdanovsky V.A.</b> On calculation of electronic regulators of welding current for multi-head welding systems .....	19
<b>McKeon D., Dadson J.R.</b> The Welding Institute today .....	28
40th anniversary of the Department of Welding Light Metals and Alloys of the E.O.PATON Electric Welding Institute	
<b>Ishchenko A.Ya.</b> Investigations and developments on technology of welding light alloys at the E.O.Paton Electric Welding Institute .....	30
<b>Dovbushchenko I.V., Steblovsky B.A.</b> Development of the processes of arc welding of aluminium and its alloys .....	32
<b>Veropaj N.M.</b> Distribution of speed and pressure of plasma flows in welding arcs .....	37
<b>Ishchenko A.Ya., Dovbushchenko I.V., Mashin V.S., Pashulya M.P.</b> Features of welding aluminium alloys by a consumable electrode in neon and its mixtures with helium and argon .....	41
<b>Poklyatsky A.G., Lozovskaya A.V., Grinyuk A.A.</b> Prevention of oxide film formation in welds in welding lithium-containing aluminium alloys .....	45
<b>Skorina N.V., Mashin V.S.</b> Coated electrode of YANA grade for welding and surfacing aluminium and its alloys .....	49
<b>Veropaj N.M., Mishenkov V.A.</b> Combined process of plasma and arc welding by different-polarity pulses of current («hydra»-process) .....	52

### BRIEF INFORMATION

<b>Tararychkin I.A.</b> Procedure for determination of the corrective actions in statistical regulation of welding processes .....	54
<b>Khorunov V.F., Sabadash O.M., Maksimova S.V., Stefaniv B.V.</b> Dispersion-strengthened heat-resistant solder .....	56
From foreign journals .....	58

### NEWS

International specialized exhibition «Stankomash EXPO 2002» .....	60
90th birth anniversary of D.M.Rabkin .....	61
90th birth anniversary of I.I.Frumin .....	62
Memorial .....	63
Article index for 2002 .....	64
Authors' index .....	68
Education programs 2003 .....	70

### ADVERTISING .....

Journal «Avtomicheskaya Svarka» is published in English under the title

**«The Paton Welding Journals».**

Concerning publication of articles, subscription and advertising, please,  
contact the editorial board



УДК 621.791:629.791:629.76

# СВАРОЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

## Ч. 2. СТЕПЕНЬ РИСКА И ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО СНИЖЕНИЯ

**Академик Б. Е. ПАТОН, А. Р. БУЛАЦЕВ, С. С. ГАВРИШ, А. А. ЗАГРЕБЕЛЬНЫЙ, С. В. ПАВЛОВА,  
В. Ф. ШУЛЫМ,** инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены результаты основных испытаний по проверке и установлению безопасности аппаратуры «Универсал» при выполнении сварочных операций в условиях открытого космоса и возможности снижения степени риска.

**Ключевые слова:** электронный луч, радиационное излучение, световое и инфракрасное излучение, высокое напряжение, электростатический разряд, брызги металла, испытания, снижение риска

Первые экспериментальные работы с ручным электронно-лучевым инструментом были осуществлены более 25 лет назад [1, 2]. Поскольку при проведении экспериментов предусматривалось непосредственное участие оператора, их программа включала анализ факторов потенциальной опасности, а также человеческих возможностей при выполнении сварки. На базе натурных сварочных экспериментов на установке УРИ (1984, 1986 гг.) и наземных испытаний аппаратуры «Универсал» в рамках программ «Международный эксперимент по сварке в космосе» (МЭСК) и «Флагман», выполненных в конце 1990-х годов с использованием более совершенной испытательной и тренажерной базы, были проведены комплексные исследования безопасности ручных электронно-лучевых технологий и намечены дальнейшие пути их совершенствования.

В настоящие времена продолжается строительство международной космической станции (МКС), плановая научная эксплуатация которой должна быть начата в середине текущего десятилетия. Создание МКС заставило участников этого уникального проекта стандартизировать практически все вопросы ее строительства и эксплуатации. Проработание МЭСК предшествовало программе «Флагман», поэтому все наиболее актуальные проектные и исследовательские проблемы по подготовке космического сварочного эксперимента с использованием электронно-лучевого инструмента нового поколения «Универсал» были отработаны в рамках этой программы специалистами ИЭС им. Е. О. Патона и NASA им. Д. Маршалла (MSFC). При подготовке эксперимента «Флагман» совместно со специалистами Российской космической корпорации (РКК) «Энергия» им. С. П. Королева, АООТ «Звезда» и ЦПК им. Ю. А. Гагарина были дополнительно проведены контрольные исследования наиболее «узких», с точки зрения безопасности эксперимента, аспектов и отработан необходимый

цикл тренировок операторов в условиях, имитирующих космические.

Это вступление сделано нами с целью объяснить, почему большая часть представленных материалов получена при проведении исследований в одном из лучших американских космических центров MSFC.

**Возможность поражения электронным лучом.** При выполнении технологических работ электронным лучом в космосе одним из основных источников опасности является его поражающее действие. В рабочем инструменте используется короткофокусная электронная пушка, удельная мощность пучка в которой уменьшается в квадратичной зависимости при увеличении расстояния до объекта воздействия. Кроме того, случайное включение электронного луча практически невозможно, так как для этого необходимо осознанно выполнить несколько последовательных операций направленным в рабочую зону инструментом. Это повышает безопасность использования ручного электронно-лучевого инструмента, хотя определенная доля риска все же остается. Исходя из изложенного главным предметом исследования было воздействие электронного луча на материалы скафандра и защитного снаряжения космонавта-сварщика.

В ИЭС им. Е. О. Патона неоднократно проводились подобные исследования, которые подтвердили поражающую способность электронного луча. Однако при подготовке МЭСК американские специалисты повторили эти исследования. Они решили проверить предположение о том, что при попадании электронного луча на изолированный фрагмент материала снаряжения астронавтов произойдет накопление заряда и, как следствие, запирание электронно-лучевой пушки (ЭЛП).

При проведении экспериментов (рис. 1) электронный луч направлялся с расстояния 25 мм на фрагмент скафандра, представляющий собой многослойный пакет материалов, который закреплен в металлической рамке, изолированной от вакуумной камеры и соединенной с измерительными устройствами. При этом появление луча не наблюдалось, хотя вся аппаратура и накал катода

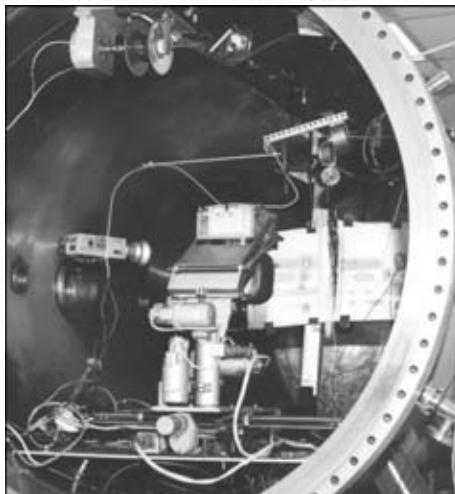


Рис. 1. Размещение оборудования при проведении экспериментов по воздействию электронного луча на материалы скафандра

были включены, а наличие заряда на образце материала скафандра зафиксировано не было. При переходе инструмента на металлическую рамку луч появлялся, а при переходе обратно на материал скафандра — мгновенно исчезал. И хотя заряд образца материала зафиксирован не был, при осмотре обнаружили подплавление материала в углу рамки. Аналогичная картина наблюдалась и на новом образце материала после его более надежного изолирования. При увеличении расстояния между инструментом и образцом до 100 мм и воздействии на него работающей пушки имело место подплавление верхнего слоя материала, после чего луч исчезал. Очередное появление луча сопровождалось прожогом следующего слоя и выключением луча, т. е. разрушение материала происходило циклически: электронный луч появлялся с интервалом 3...4 с примерно на 1 с. Однако накопление заряда и в этом случае зафиксировано не было. Подобная картина наблюдалась также при увеличении расстояния между инструментом и образцом до 175 мм.

Происходящие процессы можно объяснить следующим образом. При малом расстоянии от ЭЛП до образца происходит накопление заряда на его поверхности (хотя и не зафиксированное), что приводит к запиранию ЭЛП. В то же время наблюдается разогрев образца материала от накаленного катода, достаточный для выделения из него легколетучих компонентов. Последние, попадая в зону пушки, вызывают пробои, и срабатывает защита (электронный луч не появляется). При расстоянии до образца 100 мм и больше имеет место импульсное включение луча вследствие того, что из-за большого расстояния до образца накопленный на нем заряд успевает стечь, а легколетучие вещества из зоны пушки удаляются средствами откачки. При этом однозначно то, что электронный луч разрушает снаряжение оператора. Это подтвердили последующие эксперименты, выполненные с различными материалами защитного снаряжения оператора и элементов интерьера грузового отсека (трафлон, некстел, кевлар, бетаклос) с расстояния 100 мм, включая фрагмент перчатки скафандра — с расстояния 500 мм. Во всех случаях

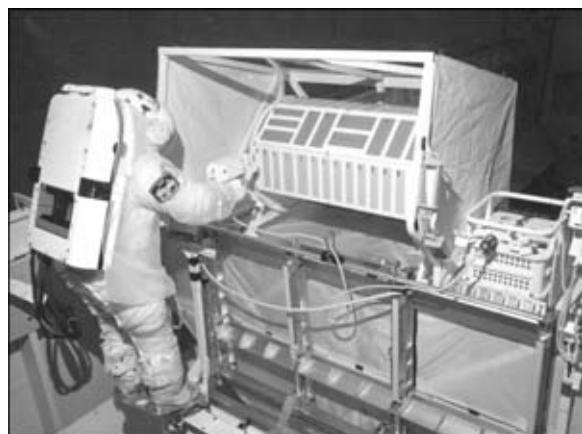


Рис. 2. Рабочее место космонавта-сварщика (поверх скафандра надета специальная защитная одежда)

при включении пушки наблюдалось ухудшение вакуума в камере от  $1 \cdot 10^{-2}$  до  $6 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-1}$  Па в зависимости от материала образца.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов подтвердили, что защита от возможного случайного поражения снаряжения оператора при работе с ручным электронно-лучевым инструментом является самым важным фактором его безопасности. Для проведения эксперимента по сварке в космосе также необходима тщательная организация рабочего места оператора. При подготовке МЭСК этому уделялось особое внимание (рис. 2).

Наряду с подвижным рабочим местом оператора, размещением образцов на поворотном барабане, рабочих электронно-лучевых инструментов в специальных гнездах использовалось также механическое устройство. Оно было разработано и изготовлено на базе рабочей платформы орбитального аппарата «шаттл» и ограничивало возможный выход руки оператора с рабочим инструментом из зоны выполнения сварочных операций (рис. 3).

Специалисты ИЭС им. Е. О. Патона продолжают разработку устройств для повышения безопасности использования ручных электронно-лучевых инструментов [3–5]. Прошел испытания метод контроля пространственного положения инструмента с помощью бесконтактных датчиков ориентации, используемых в компьютерных системах. Благодаря этому методу можно задавать любую прямоугольную область в пределах 50 × 50 см и

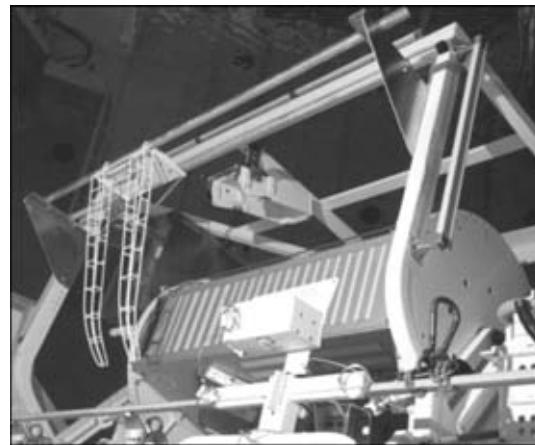


Рис. 3. Устройство, ограничивающее возможный выход руки оператора с инструментом из рабочей зоны



отслеживать положение инструмента. При выходе из этой зоны его функционирование автоматически прекращалось. Компьютер со специальным программным обеспечением составлял основу системы, с его помощью текущее положение инструмента «связывалось» с заданной конфигурацией рабочей области, а также определялся наличие ситуации «выход из рабочей области». Описанный макет системы испытывали в вакуумной камере в составе установки «Универсал». При этом были получены положительные результаты. Достоинствами указанной системы является быстрота срабатывания, надежность, доступность обучения оператора приемам задания рабочей зоны и контроля за исполнением основного требования — отключением инструмента при выходе из рабочей зоны.

Следует отметить, что, помимо общих направлений снижения риска, при использовании ручного электронно-лучевого инструмента задача повышения уровня безопасности должна решаться применительно к конкретным условиям проведения работ.

Теоретически можно создать устройства, которые полностью исключат возможность случайного поражения оператора и окружающих предметов электронным лучом. Но, как отмечалось выше, работа с ручным инструментом в условиях открытого космоса требует от оператора определенных навыков. Поэтому создание систем безопасности не является самоцелью. Оно должно быть органической составляющей комплекса конструкторских и организационных мероприятий, облегчающих выполнение оператором сложных технологических операций.

**Измерение радиационного излучения при работе аппаратуры «Универсал».** В процессе создания и испытаний аппаратуры «Универсал» в связи с более высоким (до  $U = 8$  кВ;  $U_{x,x} = 10$  кВ) по сравнению с УРИ ускоряющим напряжением было определено поле рентгеновского излучения и дозовая нагрузка при ее работе. Эти испытания выполнены в 1989 г. совместно с представителями Института ядерной физики НАН Украины с использованием спектрометра рентгеновского излучения на основе датчика SLP-04160, расположенного в вакуумной камере, и анализатора типа 5604 «Ortec». Давление в вакуумной камере поддерживали на уровне  $5 \cdot 10^{-2}$  Па, а в качестве мишени использовали пластину из нержавеющей стали толщиной 20 мм (рис. 4).

Электронно-лучевая пушка ручного инструмента аппаратуры «Универсал» включалась повторно-кратковременно (3 мин работы, 3 мин перерыва). Электронный пучок имел следующие параметры:  $U = 8$  кВ и  $I = 52$  мА. Для того чтобы зарегистрировать 200 импульсов (по условиям методики измерения на данной аппаратуре), потребовалось функционирование ЭЛП в течение 18708 с. В результате обработки полученных данных общее поле излучения составило  $7 \cdot 10^{-5}$  Гр/ч.

Согласно данным работы [6], для гамма- и рентгеновского излучения при коэффициенте качества, равном единице, дозовая нагрузка не должна превышать  $1 \cdot 10^{-4}$  Дж/(кг·ч) для данной схемы и

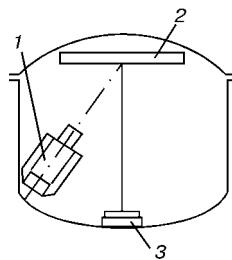


Рис. 4. Схема измерения радиационного излучения при работе аппаратуры «Универсал» с помощью датчика SLP-04160: 1 — ручной инструмент «Универсал»; 2 — мишень; 3 — датчик SLP-04160

рабочих материалов. На основании проведенных измерений был сделан вывод, что при выполнении технологических операций с использованием аппарата «Универсал» оператор может работать в течение 5...10 ч без специальных защитных средств.

В рамках МЭСК американские специалисты также провели измерения поля излучения сварочной ванны внутри и снаружи вакуумной камеры при выполнении сварочных операций с помощью аппарата «Универсал». Это было сделано, во-первых, для проверки степени защиты обслуживающего наземного персонала стенками вакуумной камеры и материалом ее иллюминаторов, во-вторых, для определения дозы облучения, которую может получить оператор в скафандре при выполнении сварочных операций в космосе. Измерение излучения сварочной ванны выполняли с помощью термoluminescentных датчиков (ТЛД), используемых для проведения персонального мониторинга специалистов, которые подвергаются воздействию ионизирующей радиации. Расположение датчиков на наружной поверхности вакуумной камеры при проведении одного из радиационных тестов показано на рис. 5, а. Внутри камеры датчики (рис. 5, б) устанавливали на одинаковом расстоянии от сварочной ван-

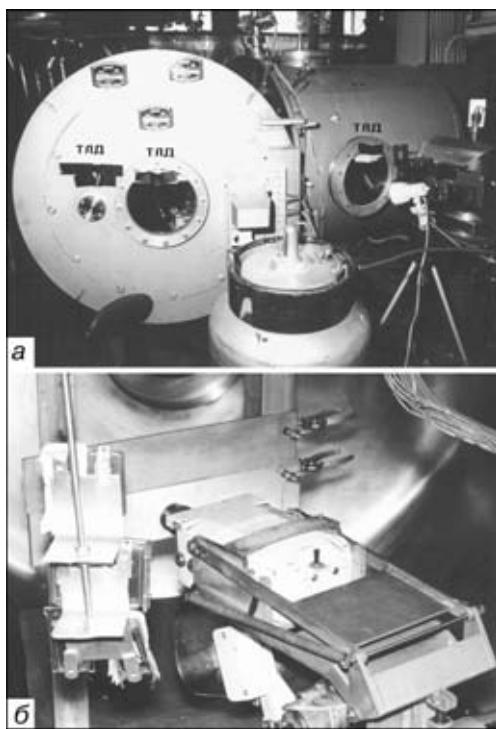


Рис. 5. Размещение термolumинесцентных датчиков на наружной поверхности (а) и внутри (б) вакуумной камеры при проведении радиационных тестов в MSFC



**Таблица 1. Показания ТЛД, установленных внутри вакуумной камеры**

Защитные средства (материал)	Доза облучения $\times 10^{-2}$ , Гр
Защитный экран на рукоятке инструмента (нержавеющая сталь толщиной 0,127 см)	0,158
Скафандр с защитным сварочным снаряжением (один слой тефлона)	4,900
Скафандр без защитного сварочного снаряжения	8,200
Остекленный гермошлем, защитный и сварочный щиток (лексан толщиной 0,5 см)	2,750

ны (450 мм), для обеспечения неподвижности сварочной ванны перемещали не инструмент, а обрабатываемый образец.

Часть датчиков была прикрыта образцами материалов скафандра, остеклением гермошлема и защитного сварочного снаряжения, что позволило оценить реальное воздействие излучения сварочной ванны на оператора в скафандре, а один датчик установлен под защитным экраном на рукоятке инструмента. При выполнении сварочных операций ток в пучке изменялся в пределах 55...76 мА.

Всего было обработано 22 образца из нержавеющей стали 304SS, алюминиевого сплава 2219 и титанового сплава Ti-6Al-4V. Общее время работы инструмента составляло 63 мин 10 с. При выполнении второго радиационного теста это время было сокращено до 30 мин, поскольку такое время было определено, как продолжительность выполнения сварочных операций по последнему сценарию проведения эксперимента в космосе. В этом случае мишенью служил алюминиевый сплав 2219, а датчики были прикрыты только образцами материала скафандра.

Анализ показаний датчиков после испытаний осуществлялся в Центре дозиметрии ионизирующей радиации Армии США с привлечением специалистов Американского национального института стандартов и технологий (НИСТ). Низкоэнергетическое рентгеновское излучение, создаваемое аппаратурой «Универсал», не попадало в рамки существующего алгоритма преобразования эквивалента дозы радиации. Поэтому возникла необходимость в дополнительной информации, касающейся работы ТЛД в области энергии фотонов. Благодаря данным, полученным в НИСТ, стало возможным максимально точно определить накопленные датчиками дозы.

Датчики, установленные на наружной поверхности вакуумной камеры и ее иллюминаторах, остались «чистыми», а установленные внутри камеры и ничем не защищенные — «зашкаливали», поскольку дозы облучения были настолько высоки, что анализирующие системы не могли их определить. Информация, полученная с помощью датчиков с различной степенью защиты (все данные приведены к 30-минутной продолжительности выполнения сварочных операций), представлена в табл. 1. Как видно из таблицы, применение защитного сварочного снаряжения (легкосъемного тефлонового костюма) уменьшает уровень облучения

оператора в 1,7 раза. Таким образом, увеличение количества слоев материала обеспечивает требуемую степень защиты оператора. Однако в отчете [7], представленном американскими специалистами, не приводятся допустимые по американским нормам дозы облучения. Не содержится в нем также информация о результатах измерений, свидетельствовавших бы об их превышении. Комиссия по безопасности, работавшая во время подготовки МЭСК и рассмотревшая все аспекты безопасности, ни разу не поднимала вопрос о радиационной защите оператора. Авторы ограничились только констатацией полученных результатов и предоставляют право специалистам в этой области сделать самостоятельные выводы. При этом следует отметить, что измерение интенсивности радиационного излучения низкоэнергетических источников является непростой задачей как в нашей стране, так и в США, о чем свидетельствуют результаты проведенных испытаний. Поэтому при подготовке сварочного эксперимента на борту ОК «Мир» по программе «Флагман» авторы руководствовались нормами, приведенными в работе [6].

**Измерение интенсивности светового и инфракрасного излучений сварочной ванны.** Эти испытания проведены в сентябре 1996 г. в MSFC. Их целью было получить ответ на вопрос комиссии по безопасности о вредном воздействии на зрение оператора видимого и инфракрасного излучений ванны расплавленного металла при проведении сварочных операций в космосе. В ходе испытаний были поставлены следующие цели: измерение интенсивности излучения сварочной ванны в процессе сварки всех предполагаемых материалов с использованием аппаратуры «Универсал» в диапазоне волн длиной  $\lambda = 300\ldots 1100$  нм с последующей экстраполяцией полученных результатов до  $\lambda = 3000$  нм (использовав теорию излучения черного тела); определение достаточности защитного светофильтра гермошлема астронавта-сварщика как надежной защиты глаз; выявление, для каких из свариваемых материалов необходима защита глаз.

Измерения проводили во время проплавления с помощью ручного электронно-лучевого инструмента аппаратуры «Универсал» алюминиевых сплавов 2219 толщиной 6 мм, 5456 толщиной 6 мм, нержавеющей стали 304SS толщиной 2,5 мм титанового сплава Ti-6Al-4V толщиной 1,5 мм.

Был использован спектральный радиометр «Optronics 740A», измеряющий интенсивность излучения как функцию длины волны и свариваемого материала. Температуру сварочной ванны определяли с помощью пирометра с лазерным прицелом. Измерения проводили через иллюминаторы вакуумной камеры, а для учета погрешностей, вносимых их стеклами, светопередачу иллюминаторов определяли до и после сварки каждого материала. Расстояние от объектива радиометра до сварочной ванны составляло 63,5 см.

Предельно допустимые значения дозы светового излучения для предотвращения поражения глаз в результате чрезмерного воздействия оптическо-

Таблица 2. Дозы излучения и максимальное время воздействия на глаза

Последствие вредного воздействия	$\lambda$ , нм	Предельно допустимые дозы излучения, $\text{мВт}/\text{см}^2$	С защитой		Без защиты	
			Рассчитанные дозы излучения, $\text{мВт}/\text{см}^2$	Максимально допустимое время воздействия, ч	Рассчитанные дозы излучения, $\text{мВт}/\text{см}^2$	Максимально допустимое время воздействия, ч
Фотокератит	180...400	3	$1,3 \cdot 10^{-9}$	> 8	$1,3 \cdot 10^{-9}$	> 8
Развитие катаракты в результате термического воздействия ультрафиолетового излучения	320...400	1	$2,0 \cdot 10^{-8}$	> 8	$2,6 \cdot 10^{-5}$	> 8
Фоторетинит, вызванный «голубым светом»	400...700	10	$3,6 \cdot 10^{-4}$	7,8	$2,2 \cdot 10^{-3}$	1,25
Термическое поражение сетчатой оболочки	400...1400	5	$1,6 \cdot 10^{-3}$	> 8	$13,7 \cdot 10^{-3}$	> 8
Термическое поражение роговой оболочки с возможным развитием катаракты	770...3000	10	0,27	> 8	4,3	> 8

го излучения были установлены на конференции государственных промышленных гигиенистов Армии США.

При определении максимально допустимого времени воздействия на глаза оператора учитывали следующие факторы: ультрафиолетовое излучение, вызывающее фотокератит; излучение, близкое к ультрафиолетовому ( $\lambda = 320 \dots 400$  нм), способствующее развитию катаракты вследствие термического ожога; фотохимическое поражение сетчатой оболочки (поражение «голубым светом»), вызывающее фоторетинит; термическое поражение сетчатой оболочки; инфракрасное излучение ( $\lambda = 770 \dots 3000$  нм), вызывающее термическое поражение роговой оболочки.

Рассчитанные значения дозы излучения и соответствующие им максимальное время воздействия на глаза с использованием астронавтом штатного солнцезащитного фильтра скафандра и без него приведены в табл. 2. Как видно из таблицы, в случае применения солнцезащитного фильтра и при расстоянии от зоны сварки до глаз 30 см и больше уровень воздействия излучения сварочной ванны на глаза в течение 2 ч (предполагаемая продолжительность эксперимента в космосе) находится ниже предельно допустимых значений, и поэтому излучения не причиняют вреда глазам астронавтов.

Без солнцезащитного фильтра в космосе максимальное время воздействия, вызывающее фотохимическое поражение «голубым светом», составляет 1,25 ч. Уровень излучения, при котором происходит термическое поражение роговой оболочки и возможно развитие катаракты, также достигает почти половины допустимых пределов. Интенсивность света может затруднить наблюдение за процессом сварки. Поэтому американские специалисты Хонглу Ву, Арнольд В. Орсак в отчете NASA «Анализ вредного воздействия на глаза сварки в космосе» (13 сентября 1996 г.) рекомендуют применять солнцезащитный фильтр при сварке нержавеющей стали и титана.

**Высокое напряжение, возможность возникновения коронных и электростатических разрядов.** Потенциальную опасность представляет высокое (до 10 кВ) напряжение, которое используется при работе ЭЛП. Устранить этот фактор невозможно, поскольку высокое ускоряющее нап-

ряжение является обязательным условием работы электронно-лучевого прибора. Поэтому речь может идти только о безопасном конструктивном исполнении рабочего инструмента.

Электронный луч формируется между катодным узлом и анодом, роль которого выполняет наружный корпус ЭЛП.

В установках УРИ и «Универсал» высоковольтный трансформатор, его выпрямитель и трансформатор накала катодного узла объединены в моноблок с изоляцией из эпоксидного компаунда [8] и расположены непосредственно на рабочем инструменте. Низкое (до 100 В) переменное напряжение на входе анодного и накального трансформаторов позволяет отказаться от высоковольтного кабеля, что существенно повышает безопасность и надежность работы ручного инструмента. Высоковольтный блок располагается в металлическом корпусе, который вместе с анодом, наружным корпусом пушки и обрабатываемым изделием находится под одним электрическим потенциалом. Таким образом, высокий отрицательный электрический потенциал локализован и не представляет опасности для оператора. Надежный контроль прочности высоковольтной изоляции на этапе изготовления установки, а также испытания при крайних значениях электрического напряжения, температуры и давления окружающей среды практически исключают возможность электрических пробоев в высоковольтном блоке. Поскольку все наружные его части находятся под одним электрическим потенциалом, то даже при возникновении нештатной ситуации поражение оператора не произойдет, вероятен только отказ в работе ручного инструмента.

Особое внимание следует уделить надежному электрическому соединению корпусов всех частей комплекта аппаратуры, обрабатываемого изделия и экранов соединительных кабелей. Сопротивление между этими элементами (особенно анод-изделие) не должно превышать 0,2 Ом. Это позволит исключить накопление электростатического заряда на обрабатываемом изделии.

По поводу возможного возникновения коронных разрядов в п. 3.4.9 объединенного документа NASA и РКА SSP 50094 (редакция А, март 2000 г.) написано следующее: «Электрические и электронные подсистемы, системы и оборудование, ко-

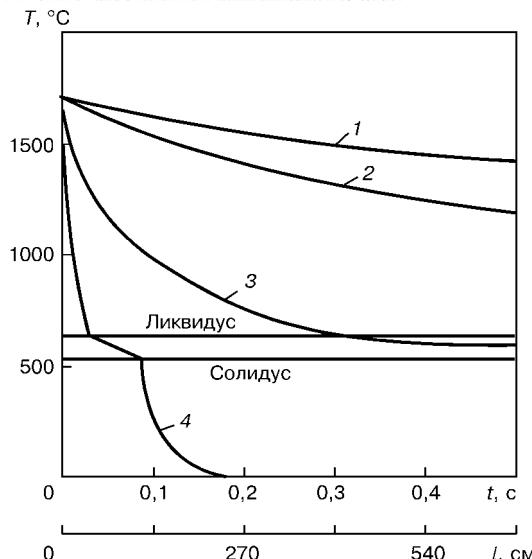


Рис. 6. Зависимость температуры частиц  $T$  и расстояния от сварочной ванны  $l$  от времени при сварке алюминиевого сплава 2219 (скорость частиц 10,5 м/с): 1 — диаметр частиц 250; 2 — 100; 3 — 10; 4 — 1 мкм

торые сами вырабатывают или используют в установившемся или переходном процессах любые электрические напряжения, равные или больше 123 В, включая входные и выходные промежуточные внутренние напряжения, должны быть так сконструированы, чтобы предотвратить появление разрушающей или повреждающей короны в любой окружающей среде на МКС».

В рассматриваемом нами комплексе аппаратуры такое возможно только внутри ЭЛП между катодом и анодом при значительном ухудшении вакуума (менее  $5 \cdot 10^{-1}$  Па) в зоне рабочего инструмента. Это вызывает срабатывание защитной системы аппаратуры и отключение луча. Рабочее давление окружающей среды для нормальной работы ручного инструмента должно составлять не менее  $5 \cdot 10^{-2}$  Па. Возникновение электрического разряда между частями аппаратуры, а также между аппаратурой и частями космического объекта невозможно, поскольку все эти элементы находятся под одним электрическим потенциалом — потенциалом корпуса.

Тем не менее, при подготовке МЭСК были проведены испытания для проверки возможности возникновения коронных и дуговых разрядов во время выполнения сварки в открытом космосе. Согласно данным, полученным в ходе 39-го полета орбитального аппарата «шаттл», предполагаемое давление в зоне скафандра находится в пределах  $1 \cdot 10^{-4}$  Па с отдельными пиками до  $1 \cdot 10^{-2}$  Па. Проведенные расчеты показали, что натекание из скафандра может достигать  $5 \cdot 10^{-3}$  Па с отдельными пиками до  $1 \cdot 10^{-2}$  Па. Поэтому было решено в вакуумной камере при давлении  $1 \cdot 10^{-2}$  Па во время сварки с помощью генератора плазмы низкого давления и игольчатого натекателя получить плазму при давлении плазмообразующего газа (аргона)  $5 \cdot 10^{-3}$ ,  $15 \cdot 10^{-3}$  и  $1 \cdot 10^{-1}$  Па и в случае возникновения коронных или дуговых разрядов с помощью средств видеорегистрации зафиксировать их. Несмотря на то что во время испытаний давление

аргона было значительно выше и находилось в пределах  $(1 \dots 2) \cdot 10^{-1}$  Па (так как при меньших его значениях процесс образования плазмы неустойчив или вообще прерывается), наличие коронных или дуговых разрядов при проведении сварочных процессов зафиксировано не было. Поэтому аппаратура признана безопасной.

**Оценка воздействия возможных брызг расплавленного металла и других продуктов, сопутствующих ручной ЭЛС, на материал скафандра и элементы интерьера.** Электронно-лучевые технологические процессы сопровождаются выделением из сварочной ванны следующих продуктов: брызг расплавленного металла в виде частиц размером до 2 мм; частиц свариваемого металла или его компонентов в твердой или жидкой форме, вылетающих из сварочной ванны и наблюдаемых как искры размером 1...500 мкм; паров металлов, представляющих собой группы атомов размером менее 1 мкм. При подготовке МЭСК наряду с выполненными американскими специалистами теоретическим анализом и расчетами был проведен также ряд испытаний и исследований для определения основных характеристик перечисленных частиц: измерение скорости частиц с помощью анализа видеозаписей, выполненных скоростной камерой; оценка их воздействия на образцы материалов скафандра и защитного снаряжения оператора; определение размеров и количества частиц. Для этого в процессе сварки каждого образца собирали все частицы, вылетающие из сварочной ванны, и под микроскопом измеряли их размеры, после чего строили статистические модели распределения.

Проанализировав данные видеозаписи сварки 223 образцов, выполненных из различных материалов, которые предполагались для использования в эксперименте, было установлено, что преимущественно искро- и брызгообразование происходит при сварке алюминиевых сплавов 2219 и 5456, в значительно меньшей степени — титанового сплава Ti-6Al-4V и практически отсутствует при сварке нержавеющей стали 304SS. При этом средняя скорость частиц, определенная по результатам скоростной видеосъемки, для алюминиевых сплавов составляла 10,5 м/с (максимально 17,9 м/с), а для титанового сплава — 18,2 м/с (максимально 33,0 м/с).

Полученная в результате термических расчетов зависимость температуры частиц алюминиевого сплава 2219 от времени с момента их отделения от сварочной ванны приведена на рис. 6. Как видно из рисунка, частицы размером 10 мкм и более могут попасть на снаряжение оператора при температуре 500 °C.

Для оценки воздействия частиц на материалы скафандра и защитного снаряжения оператора на расстоянии 300 мм от сварочной ванны располагались образцы из этих материалов (табл. 3).

Во время испытаний наблюдалось появление единичных прожогов образцов из полиэтилена и капрома при сварке алюминиевых сплавов 2219 и 5456, но не зафиксировано ни одного прожога при сварке титанового сплава.



**Таблица 3. Характеристики образцов материалов скафандров и защитного снаряжения**

Материал образца	Толщина, мм	Температура плавления (обугливания), °С
Полиэтилен	0,0375	113
Нейлон 6 (капрон)	0,0500	224
Каптон	0,0625	310...670
Тефлон	0,2425	320...610

Для определения количества и размеров частиц в процессе сварки каждого образца производился их сбор, для чего они отделялись и собирались с анода ЭЛП. На аноде устанавливали специальную ловушку, позволяющую собрать большинство частиц, вылетевших из сварочной ванны. В табл. 4 приведено общее количество частиц, собранных при сварке 26 образцов стыковых соединений длиной 175 мм каждый.

Размеры частиц при сварке алюминиевого сплава 2219, определенные на электронном микроскопе, представлены на рис. 7.

В результате проведенных исследований было установлено следующее:

1) электронно-лучевая сварка образцов сопровождается различным уровнем выделения частиц из сварочной ванны. Выделение частиц полностью отсутствует при сварке нержавеющей стали и достигает 126 частиц на один образец при сварке алюминиевого сплава 2219;

2) размеры частиц при сварке алюминиевых сплавов составляют  $d \leq 500$  мкм, а при сварке титанового сплава —  $d \leq 140$  мкм;

3) температура частиц на расстоянии 300 мм от сварочной ванны составляет  $\leq 500$  °С при сварке алюминиевых сплавов и  $\leq 1600$  °С для титанового сплава;

4) скорость выделения частиц при сварке соответственно алюминиевого и титанового сплавов равна  $v \leq 18$  и 33 м/с.

Для определения количества и состава продуктов, испаряющихся из сварочной ванны, использовали образцы-свидетели, расположенные на различных расстояниях от нее. Данные о максимальных значениях толщины покрытий и содержания в них основных элементов представлены в табл. 5.

Таким образом, при проведении испытаний появление крупных брызг расплавленного металла в виде частиц размером 1...2 мм зафиксировано не было. Сварка титанового, и особенно алюминиевых сплавов, сопровождается выделением большого количества мелких частиц, обладающих довольно высокими скоростью движения и температурой. Однако их размеры настолько малы, что повредить штатную одежду оператора (скафандр) они не могут, она будет только загрязнена, и поэтому при ручных ЭЛС следует использовать специальное снаряжение, защищающее скафандр. При проведении эксперимента по сварке в космосе сначала на борту американского орбитального кораб-

**Таблица 4. Количество частиц, собранных при сварке стыковых соединений образцов из различных материалов**

Материал образца	Количество образцов	Количество собранных частиц
Алюминиевые сплавы 2219	10	386
Алюминиевые сплавы 5456	6	123
Титановый сплав Ti-6Al-4V	6	33
Нержавеющая сталь 304SS	4	0

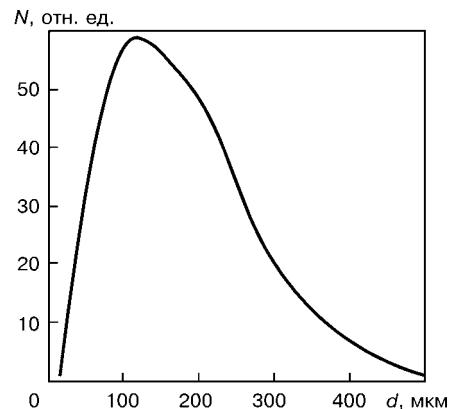


Рис. 7. Зависимость количества  $N$  частиц алюминиевого сплава 2219 от их размера  $d$

ля «шаттл» и затем российского ОК «Мир» предполагалось применение защитного сварочного снаряжения операторов. У американских астронавтов это должен быть легкосъемный костюм из тефлона (куртка и брюки) и сменимый щиток поверх светофильтра из лексана (плексигласа), а у российских космонавтов — фартук из аримидной ткани (ТУ 17-04-08/3-457-94) и сменная защита гермошлема из фторопластовой пленки Ф10 (ТУ-2245-062-00203-521-2000). Макетные образцы такого снаряжения прошли испытания в бассейне гидроневесомости в США и барокамере АООТ «Звезда» (Россия). Результаты испытаний подтвердили пригодность и эффективность снаряжения.

**Горячие зоны.** При выполнении технологических операций, связанных с нагревом и плавлением металлов, к которым относятся сварка и родственные с ней процессы, повышенную опасность для оператора, работающего в скафандре, представляют разогретые зоны свариваемых изделий, а также рабочий инструмент, нагревающийся в процессе функционирования.

Определение опасных зон при выполнении таких работ, оценка их температурных характеристик и выработка рекомендаций по безопасности осуществлялись при испытаниях в барокамерах

**Таблица 5. Максимальные значения толщины покрытий и содержания в них основных элементов**

Материал образца	Толщина покрытия, мкм	Массовая доля элементов, %					
		Mg	Si	Mn	Al	C	O
Алюминиевые сплавы 2219	—	—	35,9	—	—	7,1	57
Алюминиевые сплавы 5456	0,80	38,8	—	—	—	13,6	47,5
Титановый сплав Ti-6Al-4V	0,27	—	—	—	30,8	8,5	55,7
Нержавеющая сталь 304SS	0,25	—	—	25,2	—	20,6	51,0



Таблица 6. Зависимость времени контакта руки оператора в перчатке от температуры элементов конструкций

Температура элемента конструкции, °C	Время контакта, мин
+130	≥ 1
+100	≥ 2
+75	≥ 4
+50	> 30
-50	≥ 6
-75	≥ 4
-100	≥ 2
-130	≥ 1

как в автоматическом режиме, так и при участии оператора. Существуют определенные температурные ограничения для обеспечения безопасной работы оператора, снаряженного в скафандр. Так, по требованиям американских стандартов, которыми руководствовались в процессе подготовки к проведению МЭСК, при внекорабельной деятельности оператора температура поверхности, к которой может прикоснуться перчатка скафандра, ограничивается диапазоном  $-120\ldots+113$  °C и временем 0,5 мин (стандарт NASA-STD-300 / vol.1 / rev.). Согласно протоколу 057-25 / 73-00, для российского скафандра «Орлан-М» при работе оператора на наружной поверхности МКС должно обеспечиваться определенное время для контакта руки в перчатке с элементами конструкции в зависимости от температуры элемента конструкции.

Наружный слой оболочки скафандра допускает кратковременный контакт с поверхностями, имеющими температуру  $\pm 150$  °C (табл. 6).

Максимальная температура при выполнении сварочных операций достигает и даже несколько превышает температуру плавления свариваемых металлов. Поэтому при организации рабочего места оператора необходимо выполнение комплекса конструкторских и методических мероприятий, благодаря которым исключается возможность случайного прикосновения оператора к свариваемому образцу или изделию при ограниченной подвижности.

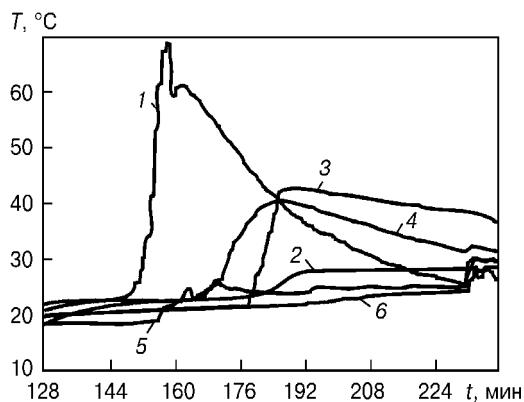


Рис. 8. Изменение температуры различных частей ручного электронно-лучевого инструмента при проведении испытаний в барокамере: 1, 3, 4 — датчики, расположенные на панелях барабана с образцами соответственно для пайки, сварки и резки; 2, 5, 6 — датчики, расположенные на защитном щитке соответственно с наружной, внутренней стороны, на рукоятке инструмента

Поскольку при проведении МЭСК как на борту орбитального аппарата «шаттл», так и ОК «Мир» предполагалось размещение свариваемых образцов на панелях поворотного барабана, изготовленного из алюминиевых сплавов и обладающих высокой теплопроводностью и теплоемкостью. Температура поверхностей панелей, к которым может прикоснуться оператор, оставалась невысокой. При проведении тренировок операторов в барокамере в процессе подготовки эксперимента по сварке на борту ОК «Мир» на панелях барабана с образцами и щите инструмента было установлено шесть датчиков с максимальной температурой измерения 300 °C, контролирующих нагрев панелей при выполнении сварочных операций. Как видно из рис. 8, их максимальная температура не превышала 70 °C (кривая 1), а возле рукояток, с помощью которых оператор поворачивает барабан, — 30 °C (кривая 5).

Функционирование самого электронно-лучевого инструмента также сопровождается его нагревом за счет внутреннего тепловыделения расположенных в нем трансформаторов и излучения сварочной ванны, находящейся на незначительном расстоянии до образца в связи с использованием короткофокусной пушки. Максимальному нагреву подвергается ее корпус (анод) за счет излучения эмиттирующей поверхности катодного узла (температура эмиттера — более 1500 °C), а также рассеивания периферийной части потока электронов и торможения их на корпусе пушки. Поэтому температура анода может достигать 150...200 °C. В инструменте для нанесения покрытий вследствие теплопередачи тигля, несмотря на систему теплоизолирующих экранов, температура может составлять 350...400 °C. В связи с этим все ручные электронно-лучевые инструменты были снабжены специальными защитными экранами, исключающими возможность случайного прикосновения оператора к разогретым до таких высоких температур частям инструмента (рис. 9). Как показали измерения при испытаниях в барокамере, температура на таких экранах не превышает 70...75 °C, а в зонах непосредственного длительного соприкосновения с перчаткой оператора (рукоятка, щиток и нижняя часть инструмента) — 40 °C (рис. 8, кривая 2).

Таким образом, проведенные испытания и тренировки в барокамере подтвердили, что для космонавта-сварщика в скафандре безопасно выполнение технологических операций нагрева и плавления металлов с помощью ручных электронно-лучевых инструментов. Для этого требуется только тщательная организация рабочего места, выполнение ряда конструкторских и методических мероприятий и надлежащий уровень подготовки оператора.

#### ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И ПОМЕХИ

Одним из важных видов испытаний аппаратуры, заявленной для участия в эксперименте по сварке в космосе, являлась оценка электромагнитных помех, включая оценку влияния работы аппаратуры на системы космического объекта и его полезную нагрузку, а также оценку влияния систем косми-



Рис. 9. Защитный экран ЭЛП ручного инструмента

ческого объекта на работу аппаратуры при проведении эксперимента.

Границные требования, предъявляемые к аппаратуре, зависят от космического объекта, состава его полезной нагрузки и самой испытуемой аппаратуры. Конкретно рассмотрим комплекс «Универсал» при работе на орбитальном аппарате «шаттл».

Внешний вид оборудования при проведении испытаний по электромагнитной совместимости показан на рис. 10. Рабочий инструмент «Универсала» и водоохлаждаемая медная мишень располагались в вакуумной камере, представляющей собой стеклянный колпак диаметром 420 мм и высотой 700 мм. Ввод в камеру силового питания и охладителя, а также ее откачуку осуществляли через основание — алюминиевую плиту толщиной 50 мм. Вакуумная камера располагалась в экранированном помещении и соединялась с наружным откачным агрегатом с помощью трубопровода с внутренним диаметром 150 мм и общей длиной около 2000 мм, поскольку по условиям испытаний размещать вспомогательное оборудование и приборы в экранированном помещении запрещалось. Вакуумный агрегат состоял из форвакуумного насоса со скоростью откачки 5 л/с и турбомолекулярного насоса со скоростью откачки 470 л/с и предельным вакуумом  $1 \cdot 10^{-6}$  Па. Уровень вакуума контролировался непосредственно на входе в откачной агрегат, в процессе испытаний он составлял  $1 \cdot 10^{-2} \dots 10^{-3}$  Па.

Все требования к испытаниям и их методики были взяты из спецификации MSFC-SPEC-521B «Требования к электромагнитной совместимости полезной нагрузки и подсистем», за исключением предела узкополосного радиоизлучения. Его значения были взяты из последнего варианта документа ISD-2-10001 «Стандартные интерфейсы орбитального аппарата «шаттл» и груза». Перед проведением МЭСК на борту орбитального аппарата «шаттл» необходимо было убедиться, что МЭСК не вызовет электромагнитной интерференции с летательным аппаратом, полезными нагрузками, участвующими в полете и скафандром астронавта. Для этого были проведены следующие виды испытаний.

**Испытания на проводящее излучение.** Они были необходимы для подтверждения того, что пульсации и переходные процессы по напряжению, которые МЭСК наложит на силовую шину

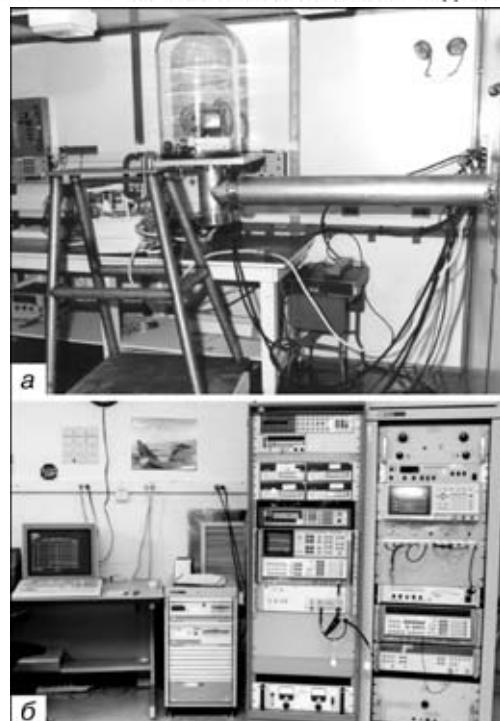


Рис. 10. Внешний вид оборудования при проведении испытаний по электромагнитной совместимости: *а* — вакуумная камера; *б* — комплекс измерительной аппаратуры

космического корабля «шаттл», не превысят допустимые значения и не вызовут электромагнитной интерференции между системами корабля и другими полезными нагрузками, подключенными к этой же силовой шине, включая следующие факторы: пульсацию напряжения в силовой шине постоянного тока по положительному и отрицательному полюсам в диапазоне от 0,03 до 20 кГц; то же по положительному и отрицательному полюсам в диапазоне от 0,02 до 50 МГц; переходные процессы в шине питания постоянного тока при включении-выключении аппаратуры.

При проведении испытаний были выявлены некоторые превышения предельно допустимых значений уровня проводящего излучения. Для устранения этих недостатков разработано и успешно испытано устройство электрического интерфейса с фильтром. Кроме того, отмечено, что необходимо подключать аппаратуру «Универсал» к отдельной силовой шине или отключать другие полезные нагрузки во время МЭСК.

**Испытания по излучению на радиочастотах.** Они проводились для проверки влияния электрических и магнитных полей аппаратуры МЭСК на электромагнитную среду орбитального аппарата, летающего кресла и других полезных нагрузок, включая узкий и широкий диапазоны радиоизлучения электрического поля на частотах  $14 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^4$  Гц, а также радиоизлучения магнитного поля на частотах 0,05...50 кГц.

**Испытания на восприимчивость к проводящему излучению.** Они были необходимы для проверки стойкости или выявления восприимчивости аппаратуры МЭСК к пульсациям напряжения или переходным процессам по напряжению, которые могут появиться в силовой шине орбитального ап-

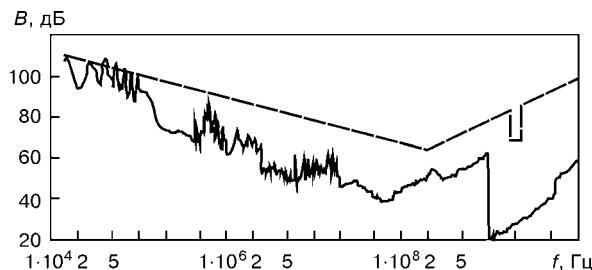


Рис. 11. Зависимость уровня излучения  $B$  аппаратуры «Универсал» от диапазона частот  $f$ : штриховая линия — допустимый уровень излучения

парата, а именно к пульсациям напряжения 4,2 В на входных шинах питания (положительной и отрицательной) в диапазоне частот 0,03...50 кГц; к пульсациям напряжения на силовой шине постоянного тока (положительной и отрицательной) 0,2 В в диапазоне частот 0,05...400 МГц. Аппаратура не должна проявлять чувствительность при тестовом сигнале с амплитудой  $\pm 56$  В продолжительностью 10 мкс. Переходный процесс применялся как к положительной, так и отрицательной шинам. Частота повторения составляла 10 импульсов в 1 с в течение 2 мин.

*Испытания на восприимчивость к радиоизлучению.* Проводились для выявления восприимчивости аппаратуры МЭСК к электрическим полям, которые могут быть частью электромагнитных условий на орбитальном аппарате в поддиапазонах радиочастот 0,014... $10^4$  МГц при напряженности электрического поля 2 В/м, 1,7...2,3 гГц — при 10 В/м и 13...15 гГц — при 12 В/м.

Испытания показали следующие недоработки аппаратуры «Универсал»: недостаточное экранирование кабелей технологического блока, рабочих инструментов и двигателя механизма подачи присадочной проволоки (рис. 11).

Кабели были доработаны путем добавления общих экранов, надежно соединенных с двух сторон с корпусом изделия, что существенно снизило уровень излучаемых помех. Большое внимание уделено рабочим инструментам с подачей присадочной проволоки, так как при работе их двигателей создавались электромагнитные помехи на рабочих частотах радиоприемника-передатчика скафандра астронавта. Для устранения этого недостатка сделано дополнительное экранирование кабеля питания двигателя, самого двигателя, установлены проходные фильтры и надежно соединены все экраны с корпусом инструмента.

Эти доработки совместно с мероприятиями, проведенными после первого вида испытаний, дали положительные результаты, и аппаратура «Универсал» получила допуск на проведение космического эксперимента. Следует отметить, что предельные значения проводимых тестов зависят от типа орбитального аппарата, полезных нагрузок и точки подключения аппаратуры. Поэтому для существующей МКС следует руководствоваться документом NASA и РКА SSP 50094 п. 3.4 «Электромагнитная совместимость» (редакция А, март 2000 г.).

**Заключение.** Несмотря на применение в ручных электронно-лучевых инструментах коротко-

фокусной пушки, электронный луч на расстоянии до 0,5 м оказывает разрушающее воздействие при прямом попадании на все материалы скафандра и защитного снаряжения космонавта-сварщика. Поэтому для обеспечения безопасного выполнения технологических операций требуется проведение ряда конструкторских и методических мероприятий, исключающих возможность попадания луча на эти материалы, а также прикосновения оператора к свариваемым изделиям.

При использовании в ручных электронно-лучевых инструментах ускоряющего напряжения до 10 кВ радиационное излучение не превышает установленной нормы. Некоторую противоречивость полученных экспериментальных данных можно объяснить использованием различных методик и сложностью измерения интенсивности излучения низкоэнергетических источников.

Предполагается, что в будущем применение ручной сварки понадобится при возникновении аварийных ситуаций, а основной объем сварочных операций, по всей видимости, будет выполняться оператором с использованием гибких аддитивных робототехнических комплексов. Это позволит повысить мощность и ускоряющее напряжение ЭЛП, необходимые для обеспечения качества сварных соединений, однако потребуется контроль интенсивности радиационного излучения. При удаленности оператора на довольно небольшое расстояние от зоны выполнения любого экстремального технологического процесса, т. е. в зоне видимости и досягаемости обрабатываемого изделия, степень общего риска может быть сведена до минимума.

Судя по результатам проведенных испытаний, световое и инфракрасное излучения сварочной ванны при ручной ЭЛС не должны вызывать особого беспокойства. При сварке алюминиевых сплавов, которые в перспективе будут основными свариваемыми металлами в космосе, не требуется использование оператором дополнительных средств защиты, а те немногие проблемы, возникающие при сварке нержавеющей стали и титановых сплавов, полностью решаются при применении космонавтом-сварщиком штатного солнцезащитного фильтра. Кроме того, в настоящее время существуют разработки светофильтров переменной плотности на основе композитных жидкокристаллических материалов с очень высоким быстродействием [9, 10], которые могут использоваться для защиты глаз оператора.

Процесс ЭЛС намного «спокойнее» по сравнению с другими способами сварки с точки зрения брызгообразования [11]. Исходя из опыта подготовки МЭСК следует, что при должной технологической подготовке сварочных операций возможно практически полностью исключить образование брызг. Что касается процессов выделения из сварочной ванны мелких частиц, приводящих к загрязнению скафандра оператора, то можно говорить только о его минимизации. Поэтому при выполнении ручной электронно-лучевой сварки применение защитного сварочного снаряжения поверх скафандра является необходимой мерой безопасности.



Сварочная аппаратура, предназначенная для использования на космических объектах, должна создавать минимальный уровень различных помех (электромагнитных, по цепям питания и др.), не влияющий на функционирование служебных систем, и быть сама защищенной от помех. Проверка ее совместимости с этими системами, а также с другими возможными полезными нагрузками осуществляется в процессе комплексных испытаний.

Результаты проведенных испытаний нового поколения ручного электронно-лучевого сварочного оборудования — одного из штатных и необходимых инструментов для ремонтно-восстановительных работ в космосе, а также специальные тренировки космонавтов-сварщиков российских экипажей в обитаемой барокамере подтвердили возможность реализации экспериментальных и прикладных сварочных задач за бортом космического объекта.

1. О возможности ручной электронно-лучевой сварки в космосе / Б. Е. Патон, Д. А. Дудко, В. Н. Бернадский и др. // Космическое материаловедение и технология. — М.: Наука, 1977. — С. 17–22.
2. Испытание ручного электронно-лучевого инструмента в открытом космосе / В. П. Никитский, В. Ф. Лапчинский, А. А. Загребельный и др. // Проблемы космического

кай технологии металлов. — Киев: Наук. думка, 1985. — С. 7–15.

3. Ланкин Ю. Н., Гавриш С. С. Устройство обеспечения безопасности работы в космосе ручным электронно-лучевым сварочным инструментом // Автомат. сварка. — 2001. — № 4. — С. 38–40.
4. Булацев К. А., Булацев А. Р. Система контроля за положением ручного электронно-лучевого инструмента // Там же. — 2001. — № 4. — С. 41–43.
5. Система безопасности электронно-лучевого инструмента // В. В. Точин, Б. И. Ющенко, П. П. Русинов и др. // Там же. — 2001. — № 4. — С. 44–45.
6. ОСП-72-80. Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений / М-во здравоохранения СССР. — М.: Энергоиздат, 1981. — 57 с.
7. Test report for the assesment of ground-based personnel and crew exposure to X-ray radiation during electron beam welding using the international space welding experiment / D. L. Edwards, C. C. Russell, M. R. Carruth, J. W. Nolin. (MSFC, Nov. 18, 1996). — 27 p.
8. А. с. 206991, МПК B 23 K. Устройство электронно-лучевой сварки / В. К. Лебедев, И. И. Заруба, В. Д. Шелягин и др. — Опубл. 08.12.67; Бюл. № 1.
9. Сморгонь С. Л., Пресняков В. В., Зырянов В. Я., Шабанов В. Ф. Устройство для поляризации и модуляции света // Приборы и техника эксперимента. — 1997. — № 1. — С. 164.
10. Crawford G. P., Zumer S. Liquid crystals in complex geometries. — London: Taylor & Francis publ., 1996. — 584 р.
11. Михайловская Е. С., Шульм В. Ф., Загребельный А. А. Результаты экспериментов по ручной ЭЛС в обитаемой барокамере // Автомат. сварка. — 2002. — № 2. — С. 23–27.

Results of basic tests conducted to verify and establish safety of the "Universal" hardware in performing welding operations under the open space conditions and the possibilities of reducing the degree of risk are considered.

Поступила в редакцию 11.07.2002



## Международная выставка-ярмарка Сварка. Родственные технологии-2003

**20.05-23.05.2003**

«Международный выставочный центр»  
Броварской просп., 15, Киев, Украина

Міжнародна виставка-ярмарок  
«Зварювання. Споріднені технології-2003»  
Київ, 20.05-23.05.2003

International Fair  
«Welding. Related Processes-2003»  
Kyiv, 20.05-23.05.2003

Международная выставка-ярмарка  
«Сварка. Родственные технологии-2003»  
20.05-23.05.2003 г.



Научно-технический комплекс  
«ІЭС им. Е. О. Патона»



Общество сварщиков Украины



Экспоцентр «Наука»

### При поддержке:

Национальной академии наук Украины,  
Министерства промышленной политики,  
Киевской государственной городской  
администрации,  
ЗАО «Международный  
выставочный центр»



### При содействии

Программы развития ООН

Дополнительную информацию Вы можете получить в НТК «ІЭС им. Е. О. Патона»:  
Тел: (38-044) 268-1254, 227-1238, 268-3523 Тел./факс: (38-044) 227-6502, 495-2616 expo@paton-expo.kiev.ua www.paton-expo.kiev.ua



# УЛУЧШЕНИЕ СВАРИВАЕМОСТИ ПРИ ПЛАКИРОВАНИИ ВЗРЫВОМ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ\*

Л. И. МАРКАШОВА, д-р техн. наук, Л. Д. ДОБРУШИН, В. В. АРСЕНЮК, кандидаты техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины)

Рассматриваются особенности пластической деформации и процесс упрочнения в зоне соединений технически чистого алюминия АД1 и отожженного алюминиевого сплава 1201АМ с высокопрочным алюминиевым сплавом типа 1201АТ, выполненных сваркой взрывом. Для повышения ресурса пластичности деформируемых слоев и улучшения свариваемости при плакировании высокопрочного алюминия сваркой взрывом предложено выполнять пластикацию свариваемых поверхностей путем их предварительной химической очистки от упрочняющих фаз.

*Ключевые слова:* сварка взрывом, алюминиевые сплавы, свариваемость, пластическая деформация, упрочняющие фазы, полосы сдвига, химическая очистка

Одним из определяющих условий получения равнопрочного соединения металлов и сплавов при их плакировании сваркой взрывом является возможность реализации в зоне соударения достаточно интенсивной пластической деформации контактных поверхностей [1–5]. Отличительной особенностью высокопрочных алюминиевых сплавов типа 1201 является их склонность к твердофазному деформационному упрочнению, в несколько раз пре-восходящему эффект других форм упрочнения (субструктурное, трения решетки и т. п.) [6–8]. Фазовые выделения в этих сплавах выступают в роли стопоров, препятствующих движению дефектов кристаллической решетки в системах скольжения в процессе деформирования, что обуславливает уменьшение объема металла, способного участвовать в пластической деформации [9]. Соответственно ухудшаются пластические свойства металла в зоне сварки, а значит и свариваемость.

Применительно к сварке взрывом под понятием улучшение свариваемости понимали возможность повышения и / или обеспечения заданных прочностных свойств соединений при использовании минимальных режимов соударения. Из опыта использования сварки взрывом известно, что высокопрочные алюминиевые сплавы типа 1201 относятся к трудносвариваемым. Сварка взрывом алюминия технической чистоты с такими сплавами особых трудностей не вызывает, что, очевидно, обусловлено повышенными пластическими свойствами алюминия, который в определенной степени компенсирует низкую пластичность высокопрочного алюминиевого сплава. Поэтому сплавы данного типа обычно плакируют через тонкие пластичные прослойки из технического алюминия.

Целью настоящей статьи явилось исследование физико-химических процессов в зоне контакта при

сварке взрывом и выяснение действительных причин, приводящих к ухудшению свариваемости при плакировании высокопрочных алюминиевых сплавов типа 1201 для последующей корректировки технологического процесса, обеспечивающей улучшение их свариваемости и получение качественных соединений.

**Материалы и методы исследования.** В проведенных экспериментах сваривали взрывом метаемые (плакирующие) пластины из технически чистого алюминия типа АД1 и отожженного алюминиевого сплава типа 1201АМ с основными пластинами из упрочненного алюминиевого сплава типа 1201АТ, в котором главной упрочняющей фазой является  $\text{CuAl}_2$  (содержание меди  $\approx 7\%$ ). Усредненные показатели пределов прочности указанных материалов соответственно составляли: 73, 200 и 420 МПа. До сварки по технологическим соображениям алюминиевую плакировку на пластинах из обоих сплавов удаляли механической обработкой и химическим травлением (обозначения сплавов в тексте статьи при этом сохранены в их оригинальном виде).

Сварку взрывом осуществляли по угловой схеме с использованием высокоскоростного тонколистового взрывчатого вещества, имеющего плотность  $1,56 \text{ г}/\text{см}^3$  и скорость детонации примерно 7600 м/с. Размеры свариваемых пластин в плане и начальный установочный угол между ними во всех экспериментах составляли соответственно  $100 \times 50$  мм и  $10^\circ$ . Контролируемые параметры режима сварки взрывом соединения АД1 + 1201АТ следующие: толщина метаемой и основной пластин — 3,0 мм; скорость соударения при сварке — 690 м/с; скорость процесса сварки — 2740 м/с. Минимальные параметры режима сварки взрывом и прочность полученных соединений 1201АМ + + 1201АТ при различных способах предварительной обработки поверхностей под сварку следующие: толщина метаемой и основной пластин — 3,72 мм; скорость соударения — 560 м/с; скорость процесса сварки — 2260 м/с; прочность соединения без обработки — 20...50 МПа; прочность соединения после химической обработки —

\* Авторы благодарят канд. техн. наук М. И. Зотова за участие в проведении экспериментов и обсуждении результатов.



190...200 МПа; прочность соединения после электрохимической обработки — 50...60 МПа.

Для оценки глубины зоны интенсивной пластической деформации  $R$  (области максимального термомеханического воздействия сварки) использовали методику специального травления дуговым разрядом в вакуумной установке ионного травления (JEE-4C, Япония), что позволило оценить глубину пластической деформации по изменению плотности дислокаций, выявляемых ямками травления. Содержание упрочняющей фазы оценивали микронализатором «Камека» по изменению концентрации меди в контактной зоне шириной  $2R$ .

Характер пластической деформации и влияние упрочняющих фазовых выделений на пластичность металла в области сварки исследовали методами оптической микроскопии, аналитической растровой электронной микроскопии (микроскоп СЕМ-515, фирма «Филипс», Голландия) и просвечивающей микродифракционной электронной микроскопии на установке JEM-200CX (фирма «Джеол», Япония) при ускоряющем напряжении 200 кВ.

#### Эксперименты и обсуждение результатов.

Для более детального изучения причин понижения пластичности и изыскания способов ее повышения вначале были проведены специальные исследования зоны контакта соединения АД1+1201АТ. Структура алюминиевого сплава 1201АТ, размеры и характер распределения упрочняющих фаз показаны на рис. 1, а. Средние размеры упрочняющих фаз в металле составляют  $\approx 6$  мкм. При прямых исследованиях на просвет эта структура в сварном соединении (в области, приближающейся к основному металлу) имеет вид, представленный на рис. 1, б. Можно видеть, что фазовые выделения различны по размерам. Исследование распределения ямок травления на поперечных шлифах сварного соединения показало, что область интенсивной пластической деформации, отличающейся повышенной плотностью структурных дефектов и прежде всего дислокаций и их направленным распределением, распространяется на глубину  $\approx 150...200$  мкм (рис. 2, а). Эта зона достаточно четко просматривается в оптическом микроскопе при небольших увеличениях. Более детальные исследования зоны контакта при исследовании на просвет показали следующие результаты. Установлено, что в приконтактной зоне со стороны сплава 1201АТ (глубина 200 мкм) происходит перераспределение фаз под действием сварочных деформаций. Во-первых, наблюдается «раскатывание» упрочняющих фаз (рис. 2, в), во-вторых, их дробление до размеров, составляющих сотые доли микрометра ( $\approx 0,07...0,01$  мкм, рис. 2 в, г). Особенно активно отмеченное перераспределение фаз наблюдается в весьма локальной зоне контакта глубиной в десятки микрометров (рис. 2 б, в). Процесс перераспределения фаз при этом сопровождается активным массопереносом меди в близлежащих к фазам областях, включая зону контакта соединения АД1+1201АТ. Исследования тонкой структуры в поперечных сечениях зоны контакта на просвет показали, что в приконтактных зонах в технически чистом и упрочненном алюминии

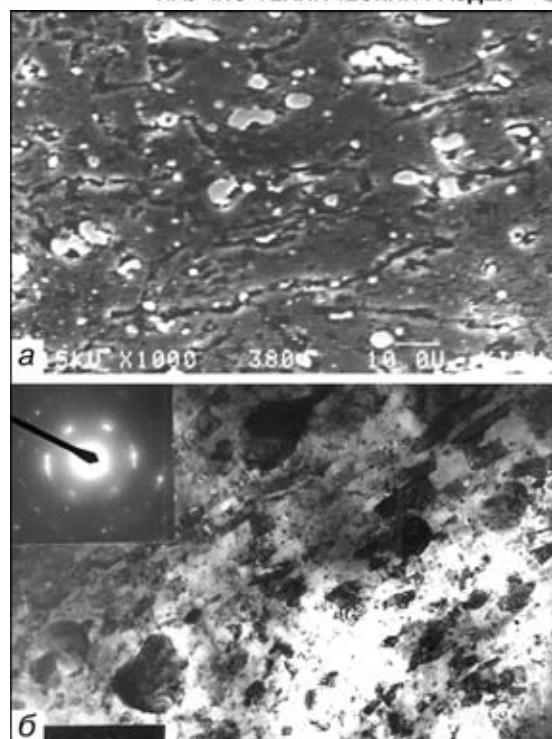


Рис. 1. Структура основного металла (сплав алюминия 1201АТ):  
а — поверхность с фазовыми выделениями  $\text{CuAl}_2$  (сканирующая электронная микроскопия,  $\times 1000$ ); б — тонкая структура и распределение фазовых выделений (просвечивающая электронная микроскопия,  $\times 15000$ )

пластическая деформация протекает по различным механизмам (рис. 2, б, г, е, ж). Так, в технически чистом алюминии пластическая деформация реализуется по сдвиговому механизму, о чем свидетельствует формирование развитой системы полос сдвига (рис. 2, б, е). В отличие от этого, в зоне сварки упрочненного сплава 1201АТ пластическая деформация реализуется путем дискретного сдвига с резкой переориентацией полос сдвига в зоне столкновения с упрочняющей фазой (рис. 2 б, г, ж). Кроме того, методами микродифракции зафиксированы структурные элементы, свидетельствующие о поворотах (ротациях) различных по размеру микрообластей упрочненного металла, что является крайней формой пластического сброса внутренних напряжений в деформируемом металле. Характер изменения типов структур, формирующихся со стороны каждого из свариваемых металлов по глубине зоны сварки, представлен на рис. 3.

Следовательно, если в зоне контакта в технически чистом алюминии пластическая деформация протекает достаточно интенсивно и практически отсутствуют препятствия для ее активной реализации, то в зоне контакта со стороны упрочненного алюминия картина иная. Дискретность полос сдвига, резкая смена их ориентации (рис. 2 г, ж) и значительное повышение плотности дислокаций в местах столкновения полос сдвига с упрочняющей фазой (рис. 2, з) свидетельствуют не только о заторможенности течения, но и о значительном локальном упрочнении алюминиевого сплава 1201АТ в зоне сварки (на глубине  $\approx 150...200$  мкм от поверхности контакта). По-видимому, значи-

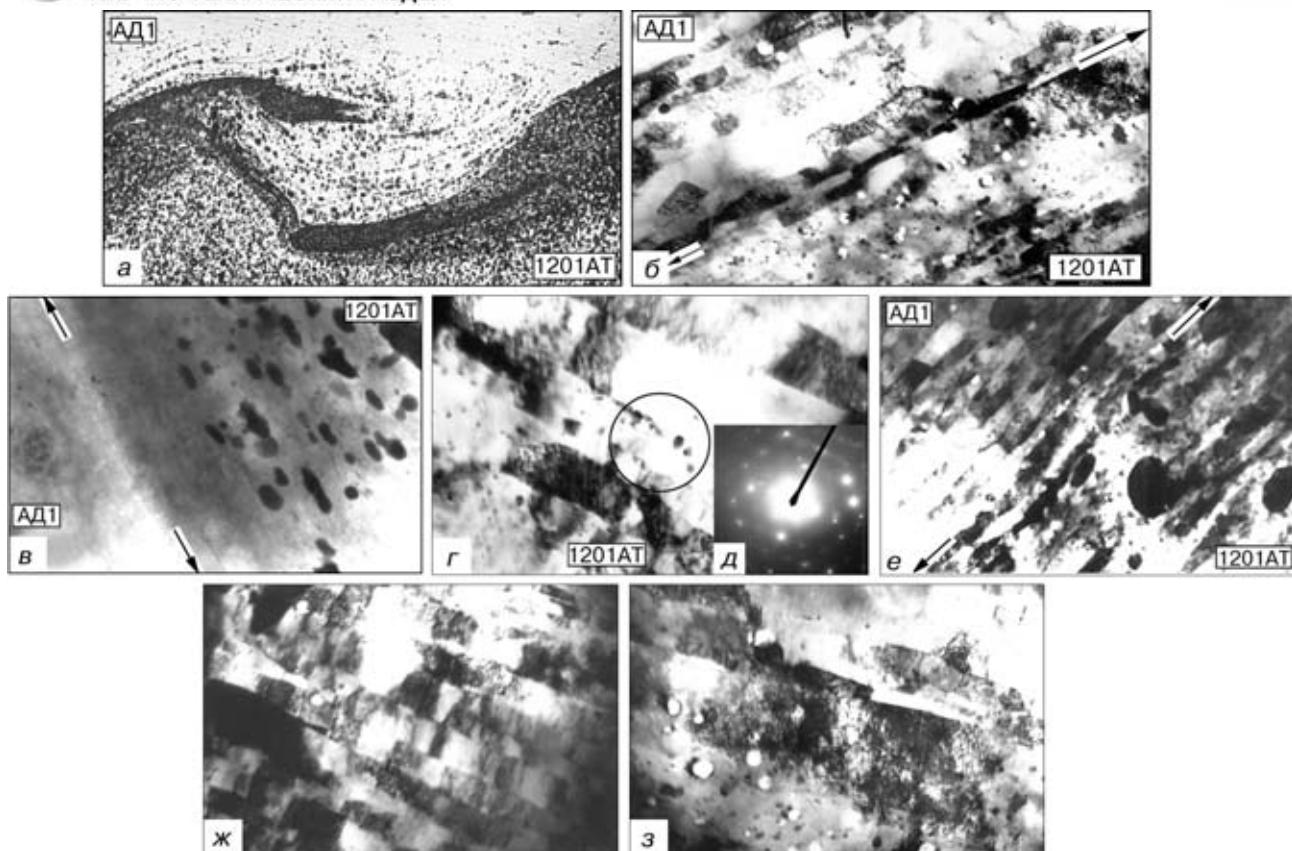


Рис. 2. Зона контакта соединения АД1+1201АТ и изменение морфологии упрочняющих фазовых выделений в сплаве 1201АТ в области сварки (стрелками показано направление контактной границы соединения): *а* — общий вид границы сварного соединения,  $\times 100$ ; *б* — тонкая структура зоны контакта АД1+1201АТ с изображением протяженных полос сдвига (АД1) и переориентации полос в местах расположения упрочняющих фаз (1201АТ),  $\times 10000$ ; *в* — вид упрочняющих фазовых выделений в зоне контакта со стороны сплава 1201АТ,  $\times 1000$ ; *г, е* — переориентация полос в сплаве 1201АТ в зоне столкновения с различными по размеру фазами ( $\times 15000$ ) (на рис. 2, *г* кружком выделен участок с мелкодисперсными фазами); *д* — дифракция полос переориентации; *ж, з* — локальное повышение плотности дислокаций в зоне переориентации полос сдвига со стороны сплава 1201АТ,  $\times 30000$

тельное упрочнение металла в зоне контакта связано не только с фазовыми выделениями и с резким повышением плотности дислокаций, но и с повышением концентрации меди, способствующей увеличению твердорастворной компоненты упрочнения металла. Кроме того, ухудшению свариваемости и часто наблюдаемому на практике расслоению таких соединений при сварке взрывом, по-видимому, может способствовать также наличие в зоне контакта весьма протяженных «раскатанных» фаз (рис. 2, *в*), которые локализуются на

глубине  $\approx 3 \dots 5$  мкм от поверхности контакта. Учитывая столь неблагоприятное влияние фазовых выделений (частично перераспределившихся, но остающихся достаточно существенными по размеру) на пластичность в области сварки, представлял интерес поиск способов очистки контактных поверхностей от фаз. Причем очистка должна быть на вполне определенную глубину, связанную с глубиной пластической деформации при сварке взрывом (в данном случае 150...200 мкм). С этой целью были использованы два способа предварительной обработки поверхностей для очистки: электрохимическое и химическое травление. Выбор данных способов был обоснован тем, что они позволяют селективно удалять фазовые выделения [10]. Кроме того, растворение избыточных фаз (и соответственно ослабление межзеренных и межфазных границ в результате селективной обработки) будет способствовать поворотам (ротации) микрообъемов деформируемого металла в процессе сварки. Последнее обстоятельство должно благоприятствовать улучшению свариваемости, поскольку к обычным механизмам пластической деформации (дислокационным, сдвиговым) становится возможным подключение дополнительного — ротационного. Расширение спектра механизмов, по которым может реализовываться пластическая деформация, особенно важно для таких жестких условий деформирования, какими возникают при сварке взрывом.



Рис. 3. Характер изменения структур и их объемной доли по глубине зоны контакта от границы соединения АД1+1201АТ, полученного сваркой взрывом

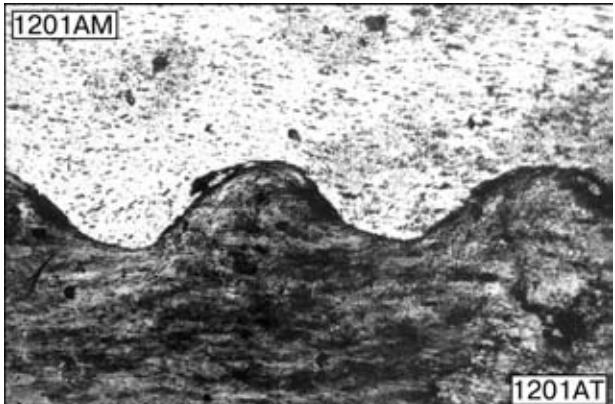


Рис. 4. Типичная микроструктура зоны соединения 1201AM+1201AT, полученного с предварительной химической обработкой поверхности

Изложенные предпосылки были положены в основу поиска возможности минимизации режимов сварки взрывом сплава 1201AM (почти втрое более прочного, чем АД1) с упрочненным сплавом 1201AT за счет специальной предварительной обработки свариваемых поверхностей. Выполнение плакирования более прочным сплавом позволяет соответственно уменьшить необходимую толщину метаемой пластины и, как следствие, импульсное воздействие на конструкцию в месте плакирования, что крайне важно при решении ряда практических задач. По технологическим соображениям предварительной обработке подвергали свариваемую поверхность только метаемой пластины из сплава 1201AM. Электрохимическую обработку (ЭХО) проводили при анодной (0,1 мВ, С.В.Э.), катодной (0,8 мВ, С.В.Э.) поляризации и потенциале коррозии фазы CuAl<sub>2</sub> (-0,5 мВ, С.В.Э.) в 5%-й соляной кислоте при температуре 20 °C. Время обработки составляло 1 ч. Химическую обработку (ХО) выполняли в 10%-м растворе щелочи при температуре 80±5 °C в течение 20 мин с последующей обработкой в 25%-м растворе азотной кислоты. Оценки глубины растративания ( $\Delta_k$ ) и содержания упрочняющей фазы CuAl<sub>2</sub> проводили параллельно с экспериментами по определению влияния способа предварительной обработки и кинематических параметров соударения на прочность получаемых соединений 1201AM+1201AT на отрыв плакирующего слоя. Полученные результаты сопоставляли с аналогичными данными без предварительной обработки.

Для обеспечения идентичности условий соударения утонение метаемых пластин, получаемое в результате предварительной обработки, компенсировали дополнительными накладными пластинами. При этом исследовали влияние суммарной толщины метаемой и накладной пластин на прочность получаемых соединений. Применение последних способствовало обеспечению необходимого времени формирования соединения за счет увеличения времени действия положительных давлений в зоне контакта в процессе соударения пластин. Установлено, что предварительная ХО обуславливает улучшение свариваемости: прочность соединения увеличивается в несколько раз и достигает прочности металла метаемой пластины из сплава

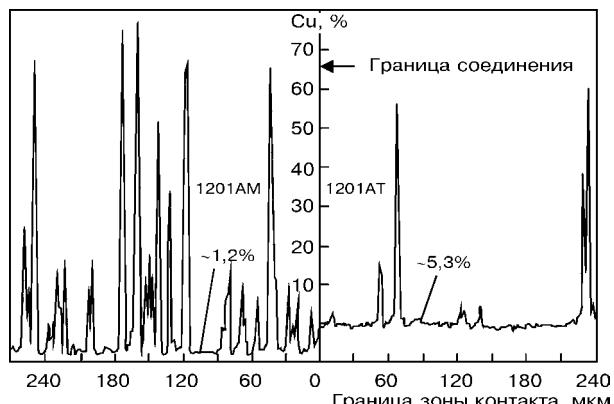


Рис. 5. Распределение концентрации меди в зоне контакта соединения 1201AM+1201AT, полученного с предварительной обработкой поверхности

1201AM в отожженном состоянии. Типичная структура зоны соединения представлена на рис. 4. Без предварительной химической обработки метаемых пластин равнопрочную (по отношению к сплаву 1201AM) сварку получить не удалось.

Из анализа распределения меди в зоне соединения (рис. 4) установлено (рис. 5), что в результате ХО ее концентрация уменьшается как со стороны сплава 1201AM, так и со стороны сплава 1201AT (в последнем примерно на 2%). Точное определение концентрации меди затруднено в связи с ее выравниванием в процессе массопереноса через контактную границу, происходящего при совместном пластическом деформировании свариваемых поверхностей, а также в связи с частичным удалением обработанного слоя в результате эффекта кумуляции при сварке взрывом. ЭХО не обеспечивает необходимую степень растворения фаз, что не способствует ослаблению межкристаллитных связей и не улучшает свариваемость.

Обобщив полученные результаты, можно рекомендовать следующие режимы плакирования взрывом сплава 1201AT и предварительной обработки сплава 1201AM применительно к решению задач, связанных с минимизацией параметров соударения в случае получения соединений 1201AM+1201AT. Так, при использовании тонколистового взрывчатого вещества с упомянутыми выше параметрами толщина метаемой пластины должна примерно вдвое превышать его толщину. При меньшей толщине необходимо использование компенсирующих накладных пластин. В противном случае может произойти расслоение образовавшегося соединения из-за недостаточности времени действия положительных давлений в зоне контакта в процессе соударения пластин. С целью повышения прочности получаемого соединения целесообразно выполнять пластификацию свариваемых поверхностей путем очистки от упрочняющих фаз, в данном случае, химическим травлением поверхности метаемой пластины из сплава 1201AM в 10%-м растворе щелочи с последующей обработкой в 25%-й азотной кислоте.

Представленные разработки были успешно использованы при создании технологий восстановительного ремонта плакированием сваркой взрывом различных повреждений в основном металле тон-



костенных оболочечных металлоконструкций летательных аппаратов, в том числе изготовленных из термоупрочняемых алюминиевых сплавов типа 1201АТ.

## Выводы

1. Пластическая деформация в условиях сварки взрывом локализуется на определенной глубине  $R$  от поверхности раздела свариваемых пластин. Эта глубина преимущественно зависит от толщины метаемой пластины и режимов ее соударения с плакируемым основанием и является контролируемым параметром процесса.

2. В зависимости от типа свариваемых металлов пластическая деформация в зоне сварки взрывом происходит по различным механизмам. В чистых по фазовому состоянию металлах (алюминий типа АД1) она преимущественно осуществляется по сдвиговым механизмам за счет мощных полос сдвига. В металлах, содержащих упрочняющие фазы (алюминий типа 1201АТ), она затруднена и осуществляется с участием сдвига и переориентации, которая происходит в зонах столкновения полос сдвига с упрочняющими фазами.

3. Для повышения ресурса пластичности деформируемых слоев и улучшения свариваемости при плакировании алюминиевого сплава 1201АТ

сваркой взрывом рекомендуется выполнять пластификацию свариваемых поверхностей путем устранения хрупких или малопластичных фаз, в данном случае химическим травлением поверхности метаемой пластины из сплава 1201АМ в 10%-м растворе щелочи с последующей обработкой в 25%-й азотной кислоте.

1. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. — Новосибирск: Наука, 1972. — 188 с.
2. Плакирование стали взрывом / А. С. Гельман, А. Д. Чудковский, Б. Д. Цемахович, И. Л. Харина — М.: Машиностроение, 1978. — 190 с.
3. Эпштейн Г. Н. Строение металлов, деформированных взрывом. — М.: Металлургия, 1988. — 280 с.
4. Ольсон Г. Б., Мескол Дж. Ф., Азрин М. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов: Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1984. — С. 67–89.
5. Мурр Л. Е. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации: Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1984. — С. 202–241.
6. Гордиенко Л. К. Субструктурное упрочнение металлов и сплавов. — М.: Наука, 1973. — 222 с.
7. Роль дислокаций в упрочнении металлов / В. С. Иванова и др. — М.: Наука, 1965. — 179 с.
8. Гольдштейн М. И., Литвинов В. С., Бронфин Б. М. Металлофизика высокопрочных сплавов. — М.: Металлургия, 1986. — 307 с.
9. Орован Е. Dislocation in metals. — New York: AIME, 1954. — 103 р.
10. Акимов Г. В. Теория и методы исследования коррозии металлов. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1945. — 414 с.

Peculiarities of plastic deformation, hardening and plasticisation in the zone of joining commercially pure aluminium AD1 and annealed aluminium alloy 1201AM to high-strength aluminium alloy of the 1201AT type in explosion welding are considered. It is suggested that plasticisation of the mating surfaces should be done by their preliminary cleaning from hardening phases to increase safety factor for ductility of the deformed layers and improve weldability in explosion cladding of high-strength aluminium.

Поступила в редакцию 25.07.2002

## Вниманию подписчиков журнала, директоров организаций и фирм, руководителей маркетинговых служб!

**В рекламном разделе журнала  
«Производители товаров и услуг в области сварочного производства»**

бесплатно публикуются сведения о производимых в организациях и фирмах СНГ видах продукции с указанием реквизитов организации (фирмы).

Приглашаем Всех заинтересованных заявить о себе.

Ваши предложения направляйте в адрес редакции.



УДК 621.791.75.03

# К РАСЧЕТУ ЭЛЕКТРОННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ СВАРОЧНОГО ТОКА ДЛЯ МНОГОПОСТОВЫХ СВАРОЧНЫХ СИСТЕМ

**А. Е. КОРОТЫНСКИЙ, канд. техн. наук, Н. М. МАХЛИН, В. А. БОГДАНОВСКИЙ, инженеры**  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Показано, что основной недостаток многопостовых систем на основе балластных реостатов, заключающийся в повышенном энергопотреблении, может быть устранен путем их замены на электронные регуляторы сварочного тока, выполненные на силовых транзисторных ключах третьего и четвертого поколения. В основу таких схем положены конверторы сварочного тока на базе широтно-импульсных модуляторов с расширенными функциональными возможностями сварочно-технологических свойств.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, многопостовые сварочные системы, энергосбережение, конвертор, инвертор, снаббер, силовой транзисторный модуль

Характерной особенностью сварочного производства при монтаже и ремонте объектов энергетики, metallurgii, нефтегазохимического комплекса, трубопроводного транспорта, а также в судостроении, тяжелом и транспортном машиностроении и некоторых других отраслях индустрии является необходимость сосредоточения на ограниченной производственной площадке значительного количества сварочных постов. В этих случаях целесообразно применение систем централизованного снабжения постов электроэнергией, получивших название многопостовых сварочных систем (МСС) [1–4].

Наибольшее распространение МСС получили при ручной дуговой сварке (ММА), механизированной сварке в защитных газах (МИГ/МАГ) и сварке неплавящимся электродом в инертных газах (ТИГ). Они включают мощный источник питания с жесткой внешней вольт-амперной характеристикой (ВАХ), индивидуальные сварочные посты и соединяющие их разветвленные электрические сети. Каждый сварочный пост подключен к источнику питания через выполненный на линейных или нелинейных резисторах балластный реостат, с помощью которого осуществляется регулирование режима сварки [3, 5–8]. Подобные МСС отличаются рядом преимуществ: требуются меньшие по сравнению с эквивалентным числом однопостовых выпрямителей эксплуатационные расходы; имеют более высокие показатели надежности; отсутствует необходимость прокладки временных сетей напряжением 380 или 220 В, создающих повышенную опасность в местах выполнения сварки; возможна эксплуатация в широком диапазоне температур окружающей среды. Однако МСС имеют также существенные недостатки: ярко выраженная зависимость сварочного тока от колебаний напряжения питающей сети и изменения длины дугового промежутка; взаимное влияние сварочных постов при одновременной их работе; отсутствие возможности поддерживать с большой точностью

заданные технологические режимы, а также программировать цикл сварки, а также осуществлять режимы сварки модулированным током; частые ремонты балластных реостатов [3].

Основной недостаток МСС с балластными реостатами является низкий КПД, а следовательно, высокие энергозатраты на сварочные работы, что обусловлено значительными потерями мощности в балластных реостатах (50...80 % мощности, потребляемой сварочным постом). КПД сварочного поста в МСС с балластными реостатами в соответствии с работой [5] определяется как

$$\eta_{\text{п}} = U_{\text{д}} / U_{\text{ном}},$$

где  $U_{\text{д}}$  — напряжение на дуге;  $U_{\text{ном}}$  — номинальное рабочее напряжение источника питания (выпрямителя).

Общий КПД МСС (без учета потерь в магистральных шинопроводах) имеет вид

$$\eta_{\text{МСС}} = \eta_{\text{и}} \eta_{\text{п}},$$

где  $\eta_{\text{и}}$  — КПД источника питания (выпрямителя).

Из приведенных соотношений видно, что при достаточно высоком КПД многопостовых выпрямителей (90...92 %) КПД МСС с балластными реостатами в диапазоне наиболее применяемых и технологически обоснованных режимов сварки в случае сварки MMA и МИГ/МАГ не превышает 45, а при ТИГ — 23 %.

Поэтому почти одновременно с началом широкого применения МСС с балластными реостатами предпринимаются попытки создания более экономичных МСС на базе электронных регуляторов сварочного тока [5, 9–12]. Однако практическому решению этой задачи препятствовало отсутствие надежно работающих силовых полупроводниковых приборов, способных коммутировать значительную мощность с высокой частотой (16 кГц и более).

Разработка и освоение в последние 10–15 лет промышленного производства мощных полевых транзисторов (MOSFET), биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) и других аналогичных им силовых приборов, средств управления этими приборами — интегральных драй-

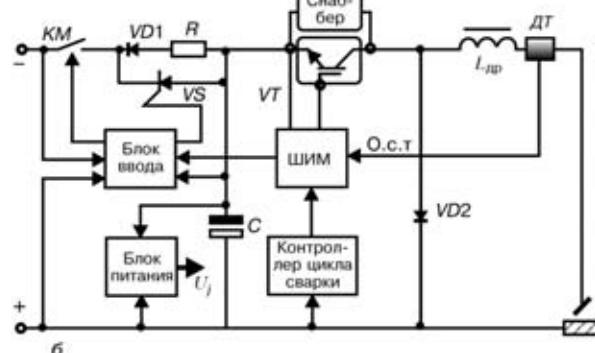
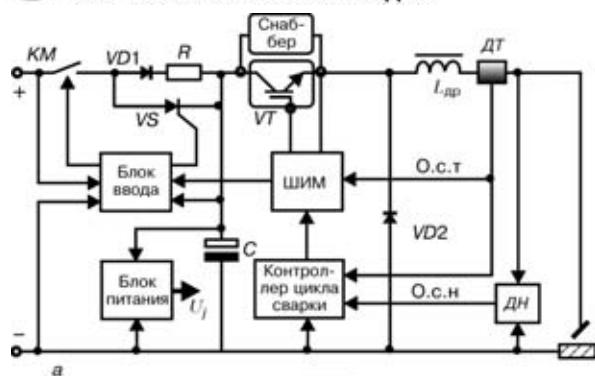


Рис. 1. Структурно-функциональные схемы регуляторов сварочного тока для сварки MMA (а) и ТИГ (б): О.с.т и О.с.н — обратная связь соответственно по току и напряжению (остальные обозначения см. в тексте)

веров, контроллеров широтно-импульсной модуляции (ШИМ), а также быстродействующих силовых диодов и элементов снабберных цепей обеспечили возможность создания надежных импульсных высокочастотных преобразователей и на их базе высокоеффективных стационарных и мобильных МСС нового поколения.

Среди многообразия полупроводниковых импульсных преобразователей постоянного тока наибольшее распространение получил однотактный преобразователь (конвертор) понижающего типа. Он отличается простой схемой силовой части, способностью надежно функционировать при изменениях в широких пределах напряжения питания и сопротивления нагрузки, высоким КПД, составляющим обычно 80...90 %. Значение коэффициента мощности конвертора этого типа приближается к единице. Поскольку силовые полупроводниковые приборы конвертора включены в цепи пониженного напряжения, регуляторы сварочного тока, выполненные по схеме конвертора понижающего типа, надежнее инверторных источников питания, а их свойства как исполнительных устройств в системах автоматического регулирования не хуже, чем у инверторов [13, 14].

Класс конверторов постоянного тока изучен достаточно хорошо. Вместе с тем, применение конвертора понижающего типа в качестве регулятора сварочного тока имеет некоторые особенности, влияющие как на выбор параметров элементов силовой части, так и на построение системы управления регулятора. К таким особенностям можно отнести сравнительно высокий уровень коммутируемой мощности (3...10 кВт), динамический характер нагрузки, изменяющейся в процессе сварки с вы-

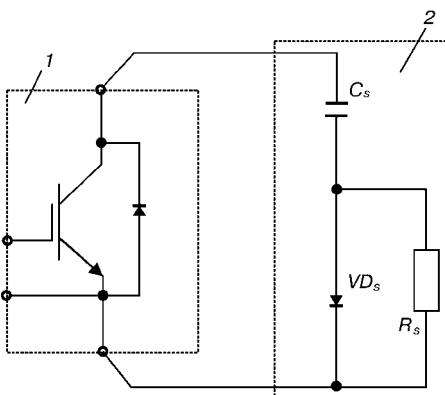


Рис. 2. Схема снабберной цепи: 1 — транзисторный модуль; 2 — спаббер

ской скоростью от холостого хода до короткого замыкания, вытекающую из условий обеспечения стабильности и устойчивости процесса дуговой сварки необходимость работы конвертора в режиме непрерывных токов индуктивного накопителя (дронселя), значительную тепловую мощность, рассеиваемую полупроводниковыми приборами силовой части. Система управления регулятора должна обеспечивать формирование статических и динамических ВАХ во всем диапазоне изменения параметров нагрузки.

На рис. 1 приведены структурные схемы регуляторов сварочного тока для сварки MMA и МИГ/МАГ и сварки ТИГ.

Надежность и КПД таких регуляторов в значительной степени зависят от типа и параметров активных элементов, на основе которых выполнена их силовая часть. В качестве силового транзисторного ключа  $VT$  могут быть применены MOSFET- и IGBT-модули, имеющие высокое входное сопротивление и в силу этого потребляющие в статическом режиме незначительную мощность управления. MOSFET-модулям присущи наилучшие среди современных силовых полупроводниковых приборов частотные свойства. Они имеют высокие скорости переключения, а следовательно, низкие динамические потери. Вместе с тем у MOSFET-модулей с напряжением сток-исток более 200 В потери проводимости значительно выше, чем у IGBT-модулей. MOSFET-модули существенно уступают IGBT-модулям и по характеристикам в области безопасной работы, и по коммутационным возможностям (напряжению, току, рассеиваемой мощности). Поэтому при характерной для регуляторов сварочного тока мощности нагрузки более 3 кВт и частоте преобразования 16...30 кГц наиболее целесообразным является применение IGBT-модулей с наибольшим допустимым напряжением коллектор-эммитер в выключенном состоянии  $U_{CES}$ , составляющим приблизительно 600 В. Как силовые полупроводниковые приборы они имеют ряд уникальных свойств [15, 16]. Типичные значения параметров IGBT-модулей третьего поколения с  $U_{CES} = 600$  В в промышленных сериях фирм «Mitsubishi Elektric», «International Rectifier», «Semikron», «Siemens», «Hitachi» и др., лидирующих в области производства этих модулей, приведены ниже:

**Техническая характеристика IGBT-модулей**

Наибольший длительный постоянный ток коллектора $I_c$ , А	600
Напряжение насыщения коллектор–эммитер (при $I_c = 100 \dots 600$ А) $U_{CESAT}$ , В	1,5 … 2,8
Время задержки включения (при $I_c = 100 \dots 600$ А) $t_{d(on)}$ , нс	85 … 350
Время нарастания коллекторного тока при включении (при $I_c = 100 \dots 600$ А) $t_r$ , нс	65 … 600
Время задержки выключения ( $I_c = 100 \dots 600$ А) $t_{d(off)}$ , нс	350 … 680
Время спада коллекторного тока при выключении (при $I_c = 100 \dots 600$ А) $t_f$ , нс	55 … 300
Потери мощности (при $I_c = 100 \dots 600$ А), мВт·с:	
при включении $E_{on}$	7 … 36
при выключении $E_{off}$	5 … 42
Диапазон допустимых температур $p-n$ перехода $T_j$ , °C	-40 … -150
Диапазон допустимых температур окружающей среды (без протекания тока через модуль) $T_{STG}$ , °C	-40 … -125

Важными характеристиками, существенно влияющими на надежность и КПД регулятора, являются быстродействие и динамическое сопротивление обратного диода  $VD2$ . Время обратного восстановления  $t_{RR}$  диода  $VD2$  определяет коммутационные токовые перегрузки силового транзисторного ключа  $VT$  IGBT-модуля. У быстродействующих диодных модулей таких фирм, как IXYS, «International Rectifier», «Semikron», прямой ток  $I_F$  составляет до 600 А, прямое напряжение  $U_F = 1,1 \dots 2,2$  В, обратное напряжение  $U_{RFM}$  — до 1200 В, время обратного восстановления —  $t_{RR} = 150 \dots 300$  нс. Такие значения параметров диодных модулей обеспечивают возможность применения их в силовой части регуляторов сварочного тока в качестве обратного диода.

Наиболее рациональным для построения силовой части регуляторов сварочного тока представляется использование чопперов — интегрированных силовых приборов, в которых IGBT-транзистор объединен с обратным диодом в одном диод-транзисторном или транзистор-диодном модуле. В диапазоне значений тока до 400 А чопперы изготавливаются фирмами «International Rectifier», «Semikron» и др. Параметры IGBT-транзистора и обратного диода чопперов имеют практически такие же значения, что и эквивалентные по току единичные IGBT-модули и быстродействующие диодные модули.

К обязательным элементам силовой части регулятора относится снаббер (см. рис. 1) — демпфирующая цепь для уменьшения динамических потерь путем коррекции траектории рабочей точки при выключении силового транзисторного ключа. В случае IGBT-транзистора снаббер, имеющий такую же конфигурацию (рис. 2), предназначен для ограничения всплесков переходных напряжений на транзисторе при его выключении, обусловленных паразитными индуктивностями соответственно снаббера  $L_s$  и шины  $L_p$  силовой цепи IGBT-модуля, а также высокими значениями  $dI_c/dt$  — скорости изменения тока коллектора  $I_c$  при выключении IGBT-модуля. На рис. 3 приведена диаграмма напряжения на IGBT-модуля при его выключении с использованием снаббера. Всплеск напряжения

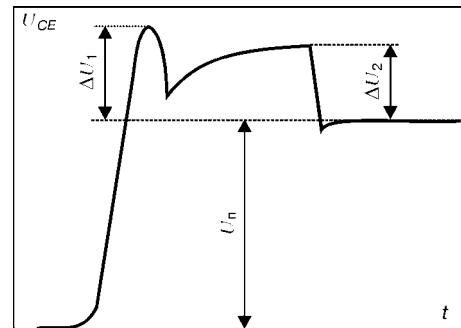


Рис. 3. Диаграмма напряжения коллектор–эммитер  $U_{CE}$  при выключении IGBT-модуля с использованием снаббера

$\Delta U_1$  вызван в основном индуктивностью  $L_s$ . Величина  $\Delta U_1$  определяется из уравнения

$$\Delta U_1 = L_s dI_c/dt.$$

Поскольку  $dI_c/dt$  может достигать значений 0,01 … 0,02 А/нс [16], для ограничения значений  $\Delta U_1$  (не более 100 В) паразитная индуктивность снаббера  $L_s$  не должна превышать 10,0 … 12,5 нГн. Выполнение этого требования достигается применением в снаббере быстродействующих диодов и пленочных (например, полипропиленовых) конденсаторов с низкой внутренней индуктивностью и расположением снаббера в непосредственной близости к IGBT-модулю. «Всплеск» напряжения  $\Delta U_2$  зависит от емкости конденсатора снаббера  $C_s$  и паразитной индуктивности шины  $L_p$ . Амплитуда  $\Delta U_2$  определяется из выражения

$$\Delta U_2 = I_c (L_p/C_s)^{0.5},$$

откуда при заданном максимально допустимом значении  $\Delta U_2$

$$C_s = L_p I_c^2 / \Delta U_{2 \max}^2 = L_p I_{cv \max}^2 / \Delta U_{2 \max}^2,$$

где  $I_{cv \max}$  — максимальное значение сварочного тока.

При  $I_c = I_{cv \max} \leq 400$  А в снабберах регуляторов сварочного тока емкость конденсатора  $C_s$  обычно составляет 0,68 … 1,00 мкФ, что при реальных конструктивных исполнениях силовых шин обеспечивает  $\Delta U_2 < 100$  В. Потери в снаббере определяются активной мощностью, выделяемой в резисторе  $R_s$  (см. рис. 2) в процессе разряда конденсатора  $C_s$  при включении IGBT-модуля, и могут быть рассчитаны по формуле

$$P_{SSSB} = \frac{C_s U_{II}^2 f}{2}, \quad (1)$$

где  $U_{II}$  — напряжение питания регулятора;  $f$  — частота преобразования напряжения.

Наиболее значительную часть общих потерь в регуляторе сварочного тока составляют потери в силовом транзисторном ключе и обратном диоде. Для силового транзистора любого типа полные потери мощности  $P_{SVT}$  представляют собой сумму потерь проводимости  $P_{SSVT}$  (статических), потерь при переключениях  $P_{SWVT}$  (динамических) и потерь на управление  $P_{SDVT}$ . В случае IGBT-модуля потерями на управление в силу их незначительности можно пренебречь. Статические потери оп-

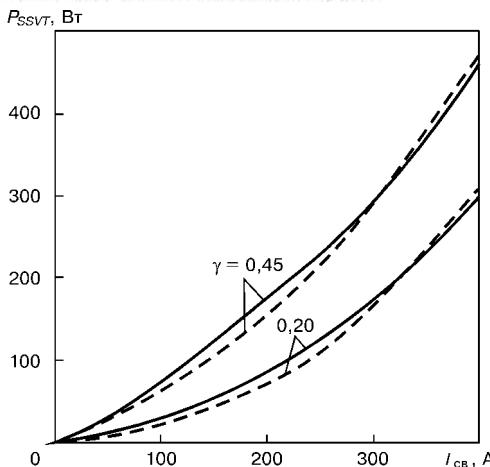


Рис. 4. Зависимость статических потерь проводимости  $P_{SSVT}$  в IGBT-модуле от сварочного тока при  $U_{CE} = 15$  В: штриховые линии —  $T_j = 125$ ; сплошные —  $80^\circ\text{C}$

ределяются напряжением на силовом транзисторе в открытом состоянии и действующим значением тока коллектора. Согласно известным для конвертора понижающего типа соотношениям [17], действующее значение тока коллектора  $I_c$  в силовом транзисторе регулятора сварочного тока составляет

$$I_c = \left[ \left( I_{cb}^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12} \right) \right]^{0.5},$$

где  $\Delta I_L = \Delta I_{cb}$  — размах пульсаций протекающего через дроссель  $L$  сварочного тока;  $\gamma = U_d/U_{\text{пп}}$  — коэффициент заполнения импульса (относительная длительность включенного состояния IGBT-модуля).

Поскольку в режиме непрерывных токов дросселя  $L \Delta I_L^2 / 12 \ll I_d^2$ , выражение для потерь в IGBT-модуле можно представить в виде

$$\begin{aligned} P_{SVT} &= P_{SSVT} + P_{SWVT} = \\ &= U_{CESAT} I_{cb} \left[ \frac{U_d}{U_{\text{пп}}} \right]^{0.5} + f(E_{SW(on)} + E_{SW(off)}), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $U_{CESAT}$  — напряжение насыщения IGBT-модуля во включенном состоянии;  $E_{SW(on)}$  и  $E_{SW(off)}$  — энергия потерь соответственно на включение и выключение IGBT-модуля, приходящаяся на один импульс.

Следует отметить, что в IGBT-модуле напряжение насыщения  $U_{CESAT}$  зависит от ряда факторов — тока коллектора  $I_c$ , температуры  $p-n$  перехода  $T_j$ , напряжения на затворе  $U_{ge}$ , а энергия потерь при переключениях ( $E_{SW(on)} + E_{SW(off)}$ ) — от напряжения  $U_{CES}$  на коллекторе в выключенном состоянии IGBT-модуля, тока коллектора  $I_c$ , сопротивления в цепи затвора  $R_g$  [15, 16]. На рис. 4 приведена построенная на основе справочных и экспериментальных данных зависимость статических потерь проводимости  $P_{SSVT}$  от сварочного тока  $I_{cb}$  при различных значениях  $\gamma$  ( $\gamma = 0,2$  — характерно для области режимов ТИГ,  $\gamma = 0,45$  — для сварки MMA и МИГ/МАГ) и температуры  $p-n$  перехода  $T_j$  для IGBT-модуля типа CM400HA-12H (фирмы «Mitsubishi Electric»). Зависимость динамических потерь  $P_{SWVT}$  этого мо-

дуля от  $I_{cb}$  при различных значениях  $f$  показана на рис. 5.

Потери обратного диода  $P_{SDV}$  включают потери проводимости  $P_{SSVD}$  и потери при обратном восстановлении  $P_{CWVD}$ :

$$\begin{aligned} P_{SDV} &= P_{SSVD} + P_{SWVD} = U_f I_f + E_{VD(off)} f = \\ &= U_f I_{cb} \left[ 1 - \frac{U_d}{U_{\text{пп}}} \right]^{0.5} + U_{\text{пп}} Q_{RR} f = \\ &= U_f I_{cb} \left[ 1 - \frac{U_d}{U_{\text{пп}}} \right]^{0.5} + U_{\text{пп}} \left( \frac{I_{RRM} t_{RR}}{2} \right) f, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $U_f$  — падение прямого напряжения на диоде;  $I_f$  — действующее значение прямого тока, протекающего через диод;  $E_{VD(off)}$  — энергия потерь при восстановлении, приходящаяся на один импульс;  $Q_{RR}$  — заряд восстановления диода;  $I_{RRM}$  — пиковое значение обратного тока при восстановлении;  $t_{RR}$  — время обратного восстановления.

Прямое падение напряжения  $U_f$  зависит от прямого тока  $I_f$ , максимально допустимого значения обратного напряжения  $U_{RRM}$  и температуры  $p-n$  перехода  $T_j$ ; пиковое значение обратного тока  $I_{RRM}$  — от  $I_f$ ,  $U_{RRM}$ ,  $T_j$  и скорости спада прямого тока  $di_f/dt$  при восстановлении, а в чопперах — еще и от сопротивления  $R_g$  в цепи затвора IGBT-модуля. Функцией  $di_f/dt$  и  $T_j$  является также время обратного восстановления  $t_{RR}$ . Расчеты показали, что при частоте преобразования до 30 кГц и применении быстродействующих диодов с  $U_{RRM} \leq 400$  В,  $t_{RR} \leq 200$  нс потери при обратном восстановлении  $P_{SWVD}$  ничтожно малы по сравнению с потерями проводимости  $P_{SSVD}$  (не более 2...5%). Поэтому выражение (3) может быть представлено в виде

$$P_{SDV} \approx P_{SSVD} = U_f I_{cb} \left[ 1 - \frac{U_d}{U_{\text{пп}}} \right]^{0.5}. \quad (4)$$

На рис. 6 приведена зависимость потерь проводимости от сварочного тока при различных значениях  $(1 - \gamma)$  и температуры  $p-n$  перехода для модуля SKMD202E (фирмы «Semikron»).

Следует заметить, что рассчитанные по выражениям (2)–(4) значения параметров носят оценочный характер и могут быть использованы для приближенного определения потерь с целью получения исходных данных для проектирования системы охлаждения модулей силового транзисторного ключа и обратного диода или чоппера и ориентировочного расчета теплового режима модулей [16]. В большинстве случаев фактические потери в IGBT-модуле несколько меньше расчетных. Это объясняется тем, что при расчете динамических потерь, преобладающих при  $f > 10$  кГц (рис. 5), обычно используются регламентируемые значения энергии потерь  $E_{SW(on)} + E_{SW(off)}$ , которые отнесены к максимальному значению напряжения коллектор-эммиттер  $U_{CES}$  IGBT-модуля в закрытом состоянии. В регуляторах сварочного тока  $U_{CE \max} < U_{CES}$  в 6...10 раз, а следовательно, реальные значения  $E_{SW(on)}$  и  $E_{SW(off)}$  существенно меньше регламентируемых. Несколько меньше и фактические потери в обратном диоде, так как в реальных условиях  $25 < T_j < 125^\circ\text{C}$ , а регламентируемые



значения  $U_f$ , как правило, отнесены либо к  $T_j = 25^\circ\text{C}$ , либо к  $T_j = 125^\circ\text{C}$ . Из выражений (2)–(4) видно, что в регуляторе сварочного тока потери в силовом транзисторном ключе и обратном диоде зависят от напряжения на дуге  $U_d$ , которое в процессе сварки, особенно при сварке MMA и МИГ/МАГ, постоянно изменяется, что весьма затрудняет аналитическое определение потерь.

Более точно потери в силовых модулях могут быть определены прямым измерением температур  $T_c$  корпусов (базовых пластин) модулей. Значения  $T_c$  важны и для оценки соответствия энергетических режимов работы силовых модулей критерию надежности по тепловому режиму — максимально допустимому значению температуры чипов ( $p-n$  структур) модулей  $T_{j \max}$  (обычно  $T_{j \max} = 125^\circ\text{C}$ ). Температура  $p-n$  структур  $T_j$  и температура корпуса модуля  $T_c$  связаны известным уравнением:

$$T_j = T_c + P_s R_{th(j-c)}$$

где  $R_{th(j-c)}$  — регламентированное значение теплового сопротивления  $p-n$  переход—корпус.

На пределы регулирования сварочного тока, устойчивость и эластичность дуги, стабильность формирования сварного шва существенное влияние оказывают пульсация сварочного тока, которая определяется индуктивностью дросселя  $L$ . Для обеспечения режима непрерывного тока через дроссель конвертора понижающего типа необходимо выполнение условия [17]:

$$L_{rp} \leq R_{n \max} (1 - \gamma_{min}) / 2f,$$

где  $L_{rp}$  — граничное значение индуктивности дросселя, при котором еще обеспечивается режим непрерывности тока;  $R_{n \max}$  — наибольшее значение сопротивления нагрузки конвертора;  $\gamma_{min}$  — наименьшее значение коэффициента заполнения импульса.

Применительно к регулятору сварочного тока условие непрерывности тока через дроссель в более удобной форме может быть выражено как

$$L_{rp} \geq U_{d \ max} (1 - U_{d \ min} / U_{n \ max}) / 2f I_{cv \ min}, \quad (5)$$

где  $U_{d \ max}$  и  $U_{d \ min}$  — соответственно наибольшее и наименьшее напряжение на дуге;  $I_{cv \ min}$  — наименьшее значение сварочного тока в диапазоне его регулирования.

Условие непрерывности тока должно выполняться и при коротких замыканиях дугового промежутка, естественно, имеющих место как на стадии возбуждения дуги, так и в процессе сварки, особенно при сварке MMA и МИГ/МАГ. При этом  $U_{d \ min}$  стремится к нулю, а  $(1 - U_{d \ min} / U_{n \ max})$  в выражении (5) — к единице. С учетом этого  $L_{rp}$  можно представить в виде

$$L_{rp} > U_{d \ max} / 2f I_{cv \ min}. \quad (6)$$

В реальных регуляторах сварочного тока индуктивность дросселя  $L$  превышает расчетное значение  $L_{rp}$  не менее чем в 2...4 раза. Это объясняется стремлением оптимизировать пульсацию сварочного тока  $\Delta I_{cv} = \Delta I_L = (1 - \gamma) U_d / L_f$ , ограничить

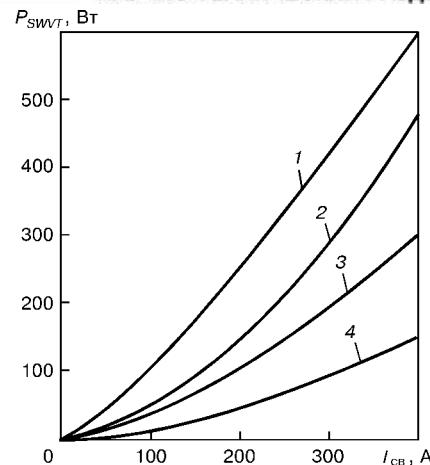


Рис. 5. Зависимость динамических потерь  $P_{SWVT}$  в IGBT-модуле от сварочного тока и частоты преобразования напряжения  $f$  при  $U_{CE} = 15$  и 300 В,  $T_j = 125^\circ\text{C}$ : 1 —  $f = 20$ ; 2 — 16; 3 — 10; 4 — 5 кГц

максимальные значения тока коллектора IGBT-модуля, прямого тока обратного диода и тока буферного конденсатора, а также уменьшить потери в сердечнике дросселя.

Ток  $I_L$ , обтекающий обмотку дросселя регулятора сварочного тока, как и в сглаживающих дросселях инверторных источников питания, имеет постоянную и переменную составляющие. В таких дросселях критерием выбора магнитного материала сердечника является значение индукции насыщения  $B_s$ , при этом масса и добротность дросселя практически не зависят от удельных потерь магнитного материала [17–19], поэтому в сердечниках сглаживающих дросселей и дросселей регуляторов сварочного тока при частотах пульсации  $I_L \approx \pm 30$  кГц, как правило, используются электротехнические стали. В сравнении с сердечниками из других магнитных материалов (например, пермаллоя, феррита) сердечники из электротехнических сталей наиболее технологичны и экономичны. Кроме того, они обеспечивают высокую стабильность индуктивности дросселей в широком диапазоне температур (от  $-60$  до  $+120^\circ\text{C}$ ).

Общие потери в дросселе  $P_{SL}$  представляют собой сумму потерь в его магнитопроводе (сердечнике)  $P_m$  и джоулевых потерь в обмотке  $P_o$ . В свою очередь, потери  $P_m$  в сердечнике из электротехнической стали складываются из суммы потерь на гистерезис и потерь на вихревые токи  $P_b$ . Так как изменение магнитной индукции в сердечнике дросселя происходит по узким частным петлям гистерезиса, то потери на гистерезис преубежительно малы и их можно не учитывать [18, 19]. Потери на вихревые токи  $P_b$  могут быть определены по приведенной в работе [19] методике расчета дросселей, согласно которой

$$P_b = V_c (b_c U_L)^2 / 12 \rho_c (w S_c)^2,$$

где  $V_c$  — объем сердечника;  $b_c$  — толщина листа электротехнической стали;  $U_L$  — действующее напряжение на дросселе;  $\rho_c$  — удельное электрическое сопротивление электротехнической стали;  $w$  — количество витков обмотки дросселя;  $S_c$  — активная площадь поперечного сечения сердечника.

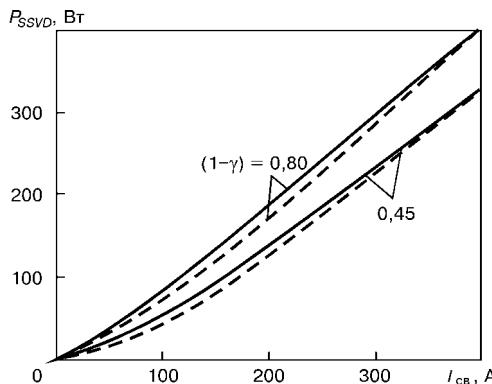


Рис. 6. Зависимость мощности потерь проводимости  $P_{SSVD}$  в обратном диоде от сварочного тока при  $U_{REM} = 300$  В (остальные обозначения см. на рис. 4)

В конверторе понижающего типа  $U_L = (U_n - U_d)\gamma = U_d(1 - \gamma)$  выражение для определения  $P_b$  может быть следующим:

$$\begin{aligned} P_b &= V_c [b_c U_d (1 - \gamma)]^2 / 12 \rho_c (w S_c)^2 = \\ &= V_c [b_c U_d (1 - U_d / U_n)]^2 / 12 \rho_c (w S_c)^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Расчеты, выполненные по методике [19] с учетом (7), показывают, что при обычных для дросселей регуляторах сварочного тока  $L \leq 250$  мГн,  $V_c \leq 2,8 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>,  $S_c \leq 1,6 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>,  $w = 18 \dots 25$  витков потери на вихревые токи  $P_b$  не превышают 1,4 Вт при  $b_c = 0,35$  мм и 3 Вт при  $b_c = 0,5$  мм. Это дает возможность применять для сердечников дросселей листы из холоднокатаной анизотропной электротехнической стали (например, марок 3411, 3412, 3413, 3414), имеющей невысокую стоимость.

Джоулевые потери в обмотке определяются с помощью выражения:

$$P_o = I_L^2 R_o = I_{cv}^2 R_o, \quad (8)$$

где  $R_o$  — активное сопротивление обмотки дросселя, которое рассчитывается по формуле

$$R_o = \rho_o w l_{cp,b} / S_{np} = \rho_o w l_{cp,b} j_d / I_{cv},$$

где  $\rho_o$  — удельное электрическое сопротивление провода обмотки;  $l_{cp,b}$  — средняя длина витка обмотки;  $S_{np}$  — площадь поперечного сечения провода обмотки;  $j_d$  — плотность тока в проводе обмотки.

Плотность тока рассчитывается по известным методикам [17, 18], при этом критерием расчета является допустимый перегрев. В большинстве случаев  $j_d = 2,5 \dots 5,0$  А/мм<sup>2</sup> (в зависимости от верхнего значения диапазона регулирования сварочного тока), а джоулевые потери  $P_o = 50 \dots 120$  Вт. С учетом того, что  $P_o \gg P_b$ , потери в дросселе можно считать  $P_{SL} \approx P_o$ .

Потери в силовой части регулятора включают и потери в элементах входной цепи — буферном конденсаторе  $C$  и тиристоре  $VS$  (см. рис. 1). Буферный конденсатор  $C$  совмещает функции сглаживающего фильтра и накопителя энергии. Необходимость в сглаживающем фильтре в основном обусловлена индуктивным характером импеданса цепи питания регулятора, что имеет место как в МСС, так и во вторичных цепях однопостовых

сварочных выпрямителей. Требования же к допустимому уровню пульсаций не являются жесткими — их уровень лимитируется лишь амплитудой переменной составляющей напряжения, допустимой для выбранного конденсатора [20]. К тому же в многопостовых выпрямителях (как и в большинстве промышленных однопостовых сварочных выпрямителей) используются трехфазная мостовая или шестифазные (двойная трехфазная с уравнительным реактором, кольцевая и др.) схемы выпрямления, обеспечивающие и без сглаживающего фильтра пульсации с максимальным размахом не более 12 % среднего значения выпрямленного напряжения. Тем не менее, выбор конденсатора для использования его в качестве буферного имеет свои особенности, вытекающие из специфики его работы как накопителя энергии, что требует применения электролитических (как правило, алюминиевых) конденсаторов большой емкости. Параметры электролитических конденсаторов главным образом зависят от частоты и температуры. Допустимая нагрузка электролитических конденсаторов определяется их нагревом и ограничивается температурой наиболее нагретой точки конденсатора  $T_h$ , определяемой соотношением [21]

$$T_h = T_a + P_{SBC} R_{th} = T_a + (I_{BC}^2 R_{ESR}) R_{th},$$

где  $T_a$  — температура окружающей среды;  $P_{SBC}$  — рассеиваемая в конденсаторе мощность потерь;  $R_{th}$  — обобщенное гармоническое сопротивление конденсатора;  $I_{BC}$  — действующее значение тока конденсатора;  $R_{ESR}$  — эквивалентное активное сопротивление конденсатора в последовательной схеме его замещения.

Поскольку в конверторе понижающего типа для интервала включенного состояния силового транзисторного ключа справедливо соотношение  $i_{BC} = i_L - I_{n, cp}$  (здесь  $i_{BC}$  — мгновенное значение тока буферного конденсатора;  $i_L$  — ток дросселя;  $I_{n, cp}$  — среднее значение тока, потребляемого конвертором), то действующее значение тока буферного конденсатора будет составлять

$$\begin{aligned} I_{BC} &= [1/T \int_0^T i_{BC}(t)^2 dt]^{0.5} = [1/T \int_0^T (i_{L_0} - I_{n, cp})^2 dt]^{0.5} = \\ &= [\gamma(1 - \gamma) I_{cv}]^{0.5}, \end{aligned} \quad (9)$$

а среднее значение переменной составляющей тока буферного конденсатора равно

$$I_{BC, cp} = 1/T \int_0^T i_{BC}(t) dt = \gamma(1 - \gamma) I_{cv}. \quad (10)$$

При дуговой сварке в большинстве случаев  $0,18 \leq \gamma \leq 0,50$ , в силу чего составляющая  $(\gamma)^{0.5}(1 - \gamma)$  в выражении (9) с достаточной для практических расчетов точностью может быть принята равной 0,365. Это позволяет расчетное значение рассеиваемой в буферном конденсаторе мощности потерь определить с погрешностью не более 10 % по приближенной формуле

$$P_{SBC} \approx 0,1332 I_{cb}^2 R_{ESR}. \quad (11)$$

Изменение напряжения (размах пульсаций) на буферном конденсаторе  $\Delta U_{BC}$  относительно среднего значения напряжения на конденсаторе  $U_{n_0}$  можно определить из выражения

$$\begin{aligned} \Delta U_{DC} &= 2\Delta Q/C_b = \\ &= 2[1/C_b \int_0^T i_{BC}(t)dt] = 2\gamma(1-\gamma)I_{cb}/C_b f, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\Delta Q$  — количество электричества, запасенного буферным конденсатором при заряде и равное количеству электричества при его разряде;  $C_b$  — емкость буферного конденсатора.

С учетом (12) коэффициент пульсаций напряжения на конденсаторе составляет

$$\begin{aligned} k_n &= \Delta U_{BC}/U_{n_0} = 2\gamma(1-\gamma)I_{cb}/C_b f U_{n_0} = \\ &= 2\gamma^2(1-\gamma)I_{cb}/C_b f U_d. \end{aligned} \quad (13)$$

Анализ выражений (12) и (13) и справочных данных по параметрам электролитических конденсаторов показал, что при  $I_{cb} \leq 400$  А и  $\gamma \leq 0,5$  для обеспечения уровня пульсаций напряжения, не превышающего допустимый, достаточна емкость буферного конденсатора не более  $27 \cdot 10^3$  мкФ. Однако в реальных регуляторах сварочного тока она в 1,2...2,5 раза больше расчетных значений, что вызвано необходимостью выполнения требований по максимально допустимым значениям длительно протекающего через конденсатор тока и температуры наиболее нагретой точки конденсатора. Наилучшим сочетанием параметров для применения в качестве буферных обладают конденсаторы, изготавливаемые фирмами «Evox Rifa», «Philips», «BNC Aerovoх», ОАО «Элеконд».

На рис. 7 показаны кривые зависимости мощности потерь в конденсаторе РЕН200РТ53ЗОМ емкостью  $33 \cdot 10^3$  мкФ от сварочного тока и температуры окружающей среды, полученные по данным фирмы «Evox Rifa» [22] с учетом (11).

Ограничение амплитуды тока заряда разряженного буферного конденсатора осуществляется путем его «мягкого» заряда с помощью цепочки, содержащей диод  $VD1$  и токоограничивающий resistor  $R$  (см. рис. 1), который по окончании заряда шунтируется тиристором  $VS$ . В установившемся режиме тиристор  $VS$  выполняет роль отсекающего диода, наличие которого практически исключает взаимное влияние входных цепей регуляторов друг на друга при их одновременной работе. Потеря мощности на тиристоре  $VS$  может быть определена из выражения

$$P_{SVS} = U_{FVS} I_{TVS} = U_{FVS} \gamma I_{cb} = U_{FVS} (U_d / U_{n_0}) I_{cb}, \quad (14)$$

где  $U_{FVS}$  — падение прямого напряжения на тиристоре;  $I_{TVS}$  — прямой ток, протекающий через тиристор.

Общие потери мощности  $P_{TOT}$  в регуляторе сварочного тока представляют собой сумму потерь

во всех его узлах. С учетом (1), (2), (4), (8), (9) и (14)

$$\begin{aligned} P_{TOT} &= f(0,5C_s U_n^2 + E_{SW(on)} + E_{SW(off)} + \\ &+ I_{cb}(U_{CE}[\gamma]^{0,5} + U_f[1 - \gamma]^{0,5} + \gamma U_{FVS}) + \\ &+ I_{cb}^2[R_0 + \gamma(1 - \gamma)^2 R_{ESR}] + P_{CS}, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $P_{CS}$  — мощность, потребляемая системой управления регулятора.

Отсюда выражение для определения КПД регулятора сварочного тока может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} \eta &= U_d I_{cb} / f(0,5C_s U_n^2 + E_{SW(on)} + E_{SW(off)}) + \\ &+ I_{cb}[(U_d / U_n)^{0,5} U_{CE} + (1 - U_d / U_n)^{0,5} U_f + \\ &+ U_d / U_{FVS}] + I_{cb}^2[R_0 + U_d / U_n (1 - U_d / U_n)^2 R_{ESR}] + P_{CS}. \end{aligned} \quad (16)$$

Из (16) видно, что одним из факторов, влияющих на КПД регулятора, является частота преобразования. В диапазоне частот 10...20 кГц на потери, связанные с частотой преобразования, приходится 20...45 % общих потерь в регуляторе. С учетом этого в регуляторах сварочного тока, выполненных с использованием IGBT-модулей, обычно  $f = 16 \dots 18$  кГц, при этом реально достижимые значения КПД составляют 84...90 %, а общий КПД МСС (без учета потерь в магистральных шинопроводах) — 75...81 %.

Сварочно-технологические свойства регуляторов сварочного тока главным образом определяются структурой и характеристиками их систем управления (СУ).

Основной частью СУ является тракт регулирования, включающий (см. рис. 1) ШИМ, контроллер цикла сварки, датчик сварочного тока и датчик напряжения сварки. Последний в состав тракта регулирования входит преимущественно в случаях сварки MMA и МИГ/МАГ. По конфигурации, функциональному назначению отдельных узлов и схемотехнике тракт регулирования аналогичен основной части СУ инверторных источников питания, в которых как способ импульсного регулирования используется ШИМ. Предпочтительность применения ШИМ в регуляторах сва-

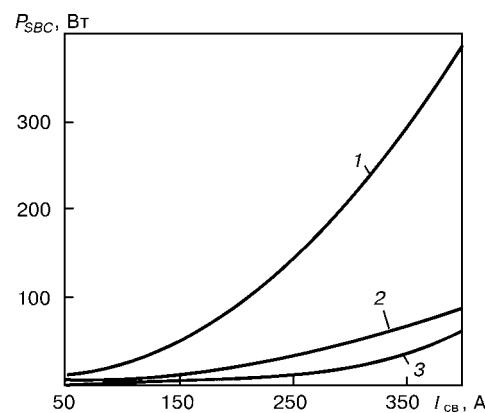


Рис. 7. Зависимость мощности активных потерь в буферном конденсаторе  $P_{SBC}$  от сварочного тока при  $f = 16$  кГц и  $R_{ESR} = 4$  мОм (при  $T = 20$  °C); 1, 2 —  $T_a = 20$ ; 3 — 50 °C



рочного тока обусловлена тем, что в конверторах с ШИМ частота переключений силового транзисторного ключа, а следовательно, частота пульсаций тока нагрузки, в процессе регулирования неизменна, при этом размах пульсаций, определяемый индуктивностью дросселя, может быть сколь угодно мал [17, 23, 24]. Это дает возможность не только оптимизировать параметры дросселя и буферного конденсатора, но и обеспечить предпосылки как для эффективного возбуждения дуги в начальной стадии процесса сварки, так и для поддержания устойчивого дугового разряда при низких значениях сварочного тока, что особенно важно в случае ТИГ.

Контроллер цикла сварки формирует все необходимые временные интервалы и сигналы задания параметров ВАХ регулятора, соответствующие каждой стадии процесса сварки, а также в случаях сварки ТИГ и МИГ/МАГ сигналы управления подачей защитного газа.

При сварке MMA и МИГ/МАГ (см. рис. 1, а) с датчиками ДТ и ДН на информационные входы контроллера поступают сигналы, пропорциональные току и напряжению сварки. В результате обработки и преобразования этих сигналов и сигнала установки сварочного тока в контроллерерабатывается сигнал задания сварочного тока, соответствующего текущей стадии плавления или переноса электродного металла. В окончательно сформированном виде сигнал задания сварочного тока с выхода контроллера подается на управляющий вход ШИМ, информационный вход которого соединен с датчиком сварочного тока.

Обеспечение в регуляторах для ТИГ вертикальных («штыковых») ВАХ достигается с помощью глубокой отрицательной обратной связи по току (см. рис. 1, б). В этом случае с выхода контроллера на управляющий вход ШИМ поступает сигнал, пропорциональный сигналу установки сварочного тока, а на информационный вход — сигнал обратной связи по току.

Помимо узлов тракта регулирования, в состав СУ регуляторов входят блок ввода и блок питания. Блок ввода контролирует процесс «мягкого» заряда буферного конденсатора  $C$ , формирует импульсы управления тиристором  $VS$  и обеспечивает защиту регулятора от нарушения полярности входного напряжения и недопустимых его значений. Кроме того, блок ввода содержит исполнительные элементы узлов СУ, обеспечивающих защиту регулятора от перегрузок по току в сварочной цепи, перегрева силовых полупроводниковых приборов, а при сварке MMA и МИГ/МАГ — и от коротких замыканий в нагрузке, продолжительность которых превышает заданные значения. При срабатывании исполнительных элементов защищины силовая часть регулятора обесточивается с помощью входного коммутирующего устройства КМ —, например, контактора.

Функциональные узлы СУ, в частности, контроллер цикла сварки и ШИМ, могут быть выполнены на аналоговой или цифровой базе, в том числе и с применением микропроцессоров [25]. Детальное рассмотрение СУ и ее узлов выходит за рамки настоящей статьи. Анализу и схемотехнике СУ в высокочастотных преобразователях посвящен ряд работ, в том числе обзорных [12, 14]. Необходимо отметить, что регуляторы сварочного тока с приведенными на рис. 1 структурами СУ обеспечивают следующее: высокое быстродействие тракта регулирования; формирование оптимизированных статических и динамических ВАХ во всем диапазоне регулирования сварочного тока; надежное возбуждение дуги и устойчивое ее горение во всех пространственных положениях и во всем технологически обоснованном диапазоне длины дуги; благоприятный перенос электродного металла (при сварке MMA и МИГ/МАГ); реализацию заданного цикла сварки и его элементов (плавное нарастание и плавный спад сварочного тока в начальной и завершающей стадиях процесса сварки при сварке ТИГ, «горячий» старт при MMA и т. п.); стабильность заданных параметров режима сварки при внесении внешних возмущений; возможность осуществления режимов сварки модулированным током.

Большинством отмеченных выше сварочно-технологических свойств обладают и разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона регуляторы сварочного тока РДГ-166УЗ.1 (для сварки ТИГ) и РДЭ-206УЗ.1 (для сварки MMA), что подтверждается опытом их промышленной эксплуатации, в частности на объектах атомной энергетики. Применение регулятора РДГ-166УЗ.1 позволило значительно повысить качество формирования швов, особенно корневых, при сварке с присадочной проволокой и без нее (преимущественно с использованием режимов модулированного тока) неповоротных стыков с V- и U-образной разделкой кромок трубопроводов и арматуры основного оборудования энергоблоков АЭС, практически устранив образование «утяжин» при сварке трубопроводов из аустенитных сталей, уменьшив тепловложение в основной металл. При сварке MMA с применением регуляторов РДЭ-206УЗ.1 обеспечивается мелкокапельный перенос электродного металла, качественное формирование шва при сварке короткой и предельно короткой дугой электродами с любым типом покрытия. Значительно облегчается сварка аустенитными электродами и электродами, предназначенными для сварки разнородных сталей. При сварке MMA модулированным током на

#### Сравнительные характеристики нагрузочных способностей многопостовых выпрямителей

Параметр	ВДМ-1001	ВДМ-1601	ВМГ-5000
Номинальный сварочный ток выпрямителя, А	1000	1600	5000
Номинальное рабочее напряжение, В	60	60	60
Первичная мощность, кВ·А	74	120	317
Количество постов MMA/ТИГ:			
в варианте балластных реостатов	10/10	16/16	50/50
в варианте электронных регуляторов сварочного тока	18/27	28/44	90/140

25...40 % повышается производительность сварки в положениях, отличных от нижнего, измельчается первичное зерно металла шва, улучшаются механические свойства сварных соединений, облегчается выполнение корня шва, в том числе при сварке с увеличенным зазором, при этом достигается качественное формирование обратного валика.

Реализация преимуществ МСС с электронными регуляторами сварочного тока может быть осуществлена двумя путями. Один из них предусматривает оптимизацию мощности и рабочего напряжения многопостового выпрямителя, а также сечение магистральных (радиальных) шинопроводов в зависимости от заданного числа сварочных постов, другой — повышение эффективности использования находящихся в эксплуатации многопостовых выпрямителей.

В таблице приведены сравнительные характеристики нагрузочной способности наиболее распространенных многопостовых выпрямителей с использованием балластных реостатов и электронных регуляторов сварочного тока, при этом ток сварочного поста принят равным 200 А, продолжительность нагрузки составляет 60 %, коэффициент одновременности работы постов  $K_0 = 0,65$ .

Оснащение действующих МСС электронными регуляторами сварочного тока позволяет не только увеличить число одновременно работающих сварочных постов, но и значительно (в 1,8...2,7 раза) уменьшить сечение проводов, соединяющих каждый сварочный пост с магистральным шинопроводом. Наиболее ощутимый выигрыш в массе соединительных проводов может быть получен при радиальной схеме МСС.

## Выводы

- По показателям энергопотребления и материалоемкости МСС с электронными регуляторами отвечают современным требованиям к сварочному оборудованию в части энерго- и ресурсосбережения.

- Многопостовые сварочные системы с электронными регуляторами отличаются такими же сварочно-технологическими характеристиками, что и высококачественные однопостовые источники питания инверторного типа.

- Расширение промышленного применения МСС с электронными регуляторами сварочного тока существенно улучшит технико-экономические показатели сварочного производства в различных отраслях индустрии.

- Лебедев В. К., Медведенко Н. П., Заруба И. И. Исследование многопостовых систем питания для сварки в углекислом газе // Автомат. сварка. — 1967. — № 10. — С. 40–44.
- Лебедев В. К., Заруба И. И., Андреев В. В. Централизованное питание постов током при сварке в углекислом газе // Там же. — 1973. — № 3. — С. 62–64.

It is shown that the main drawback of ballast variable resistor-based multi-post systems, consisting in an increased power consumption, can be avoided by replacing them with electronic current controllers based on power transistorised keys of the third and fourth generations. The main point of such circuits is a welding current converter based on a pulse-width modulator with extended functional capabilities of welding-technological properties.

- Бункин П. Я., Донской А. В. Многопостовые сварочные системы. — Л.: Судостроение, 1985. — 228 с.
- Экономическая эффективность многопостовой сварки в углекислом газе / Б. Т. Кошкарев, К. А. Милованов, В. Г. Лосев и др. // Свароч. пр-во. — 1974. — № 2. — С. 38–40.
- Оборудование для дуговой сварки. Справ. пособие / Под ред. В. В. Смирнова. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 656 с.
- А. с. 274280 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 23 К 9/00. Многопостовая система питания для электродуговой сварки / В. К. Лебедев, И. И. Заруба, Н. П. Медведенко и др. — Опубл. 24.06.70; Бюл. № 21.
- Андреев В. В., Заруба И. И., Зислин Г. С. Выбор напряжения холостого хода многопостовых систем // Автомат. сварка. — 1987. — № 10. — С. 61–64.
- Нелинейные регуляторы режима сварки в CO<sub>2</sub> при многопостовой системе питания / И. И. Заруба, М. Н. Сидоренко, В. П. Баргамен и др. // Там же. — 1983. — № 3. — С. 66–69.
- А. с. 206777 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 23 К 9/00. Устройство для регулирования сварочного тока / В. Г. Оседелько, Б. А. Каганский. — Опубл. 08.12.67; Бюл. № 1.
- Регулирование режимов механизированной сварки в CO<sub>2</sub> при использовании многопостовых источников тока / Ю. И. Драбович, А. В. Лебедев, В. В. Краченко и др. // Автомат. сварка. — 1987. — № 10. — С. 70–71.
- Патон Б. Е., Лебедев А. В. Управление плавлением и переносом электродного металла при сварке в углекислом газе // Там же. — 1988. — № 11. — С. 1–5.
- Гладков Э. А., Фетисов Г. П., Синельников Н. Г. Совершенствование управления процессами дуговой сварки на базе высокочастотных преобразователей энергии (Обзор) // Свароч. пр-во. — 1984. — № 3. — С. 13–16.
- Артеменко М. Е., Кристианич И. А., Синицина И. З. Современные методы анализа энергетических процессов в транзисторных преобразователях напряжения. — Киев, 1991. — 53 с. — (Препр. Ин-т электродинамики АН УССР, № 688).
- Схемотехника инверторных источников питания дуговой сварки: Учеб. пособие / Е. Н. Верещагин, В. Ф. Квасников, Л. Н. Мирошниченко, И. В. Пентегов. — Николаев: УГМТУ, 2000. — 283 с.
- Силовые полупроводниковые приборы / Под ред. В. В. Токарева. — Воронеж: Элист, 1995. — 662 с.
- Руководство по применению биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) и «разумных» силовых модулей (IPM) третьего поколения / Под ред. В. А. Павловского. — Препр. — Киев, 1997. — 143 с.
- Моин В. В., Лаптев Н. Н. Стабилизированные транзисторные преобразователи. — М.: Энергия, 1972. — 512 с.
- Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания / А. Н. Горский, Ю. С. Русин, Н. Р. Иванов, Я. А. Сергеева. — М.: Радио и связь, 1988. — 176 с.
- Методика расчета дросселей входного и выходного фильтров сварочных инверторных источников питания при использовании стандартных магнитопроводов / И. В. Пентегов, С. Н. Мещеряк, М. В. Турты, С. В. Рымар // Автомат. сварка. — 1997. — № 4. — С. 34–39.
- Бас А. А., Миловзоров В. П., Мусолин А. К. Источники вторичного электропитания с бестрансформаторным входом. — М.: Радио и связь, 1987. — 160 с.
- Андуриев Ю. А., Гусев В. Н., Смирнов В. Ф. Эксплуатационные характеристики и надежность электрических конденсаторов. — М.: Энергия, 1976. — 224 с.
- Electrolytic capacitors: Production catalog / Evox Rifa. — 1999–2000. — 81 p.
- Power Supplies // Electronic Ing. — 1986. — № 733. — Р. 52–58.
- Ромаш Э. М. Источники вторичного электропитания радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Радио и связь, 1981. — 224 с.
- Welding equipment: Production catalog / Bester SA. — Bielan, 2000. — 16 p.

Поступила в редакцию 21.05.2002



## СВАРКА ЗА РУБЕЖОМ

## БРИТАНСКИЙ ИНСТИТУТ СВАРКИ СЕГОДНЯ

д. МАККЕОН<sup>1</sup>, Дж. Р. ДЭДСОН<sup>2</sup>

Британский институт сварки (TWI), основанный в местечке Абингтон, близ Кембриджа в 1946 г., является одной из передовых независимых научно-технологических организаций мира. Он оказывает техническую поддержку промышленности в области сварки, соединений и родственных технологий таких, как неразрушающий контроль, обработка поверхностей и резка, а также является научным обществом, ответственным за квалификацию и регистрацию сварочного персонала в Великобритании.

**Компании группы TWI.** В настоящее время TWI состоит из ряда компаний. Наиболее крупной является TWI, Ltd. Она занимается проведением по контрактам научных исследований, передачей технологий и обучением. В состав TWI входит экспертный отдел, который предоставляет различные степени членства в зависимости от их квалификации и опыта, а также предоставляет статус штатного или работающего по контракту инженера в рамках ассоциации TWI с Британским техническим советом. Организация TWI Certification, Ltd. является аккредитованной организацией, контролирующей сертификацию персонала и компаний. TWI также имеет большой учебный центр в Малайзии, где основана дочерняя компания, TWI Training & Certification (юго-восточная Азия) Sdn. Bhd.

Plant Integrity, Ltd – компания, созданная TWI, для проведения испытаний с использованием метода дистанционного ультразвукового контроля, Teletest®. Опыт в области исследования материалов, накопленный TWI, обеспечил ему отличную репутацию, что послужило причиной создания специализированной компании The Test House для удовлетворения потребности промышленности в контроле высокого качества.

Сейчас TWI переезжает в новый лабораторно-инженерный корпус стоимостью 17 млн фунтов стерлингов, позже предполагает сдавать в аренду многие из принадлежащих институту зданий. TWI также имеет долю в Granta Park, технопарке, строящемся вблизи Abington Hall, для усиления использования активов была создана строительная

<sup>1</sup> Дэвид МакКеон занимает пост менеджера по маркетингу в TWI. Проработав девять лет в лабораториях в Абингтоне, он ушел из TWI ради карьеры в области научных разработок и маркетинга, работал главным образом с поставщиками сварочных материалов, затем вернулся в TWI, где возглавлял отдел по подготовке и сертификации специалистов до января 2000 г., когда был сформирован отдел маркетинга.

Джон Ричард Дэдсон получил диплом инженера в 1977 г. и является членом Организации инженеров-строителей и TWI. Сделав карьеру в журналистике, на радио и телевидении в 1986 г. в TWI занял пост редактора по связям с телевидением.

компания TWI Technology. Позднее здания и оборудование конференц-залов, а также столовых и кафе были сданы новой компании Mary's, Ltd., поскольку их цели отличались от основной деятельности компании.

Сотрудничество TWI с Институтом электросварки им. Е. О. Патона способствовало созданию компании Cambridge Kiev Joining Technology.

Таким образом, TWI представляет собой различные компании, которые в своей деятельности учитывают все аспекты сварки, соединений и родственных технологий, а также предполагают использование и оказание услуг, сопутствующих основной деятельности компании.

**Основная деятельность компании TWI, Ltd.** TWI занимается научно-исследовательскими разработками, предоставляет техническую информацию, оказывает консультативные услуги, проводит обучение и аттестацию. TWI – уникальный источник предоставления всех этих услуг в области соединения широкой гаммы машиностроительных материалов.

Несмотря на то что штаб-квартира TWI находится в Granta Park, близ Кембриджа (Великобритания), он имеет базы в Мидлсбро (Великобритания) и Куала-Лумпуре (Малайзия). Услуги, предлагаемые TWI, доступны по всему миру.

TWI приобрел мировую известность в связи с комплектацией рабочих групп из специалистов различных научных и технических квалификаций, задача которых состоит во внедрении как уже известных, так и передовых технологий соединения или в решении проблем, возникающих на разных этапах, начиная с исходного проектирования, выбора материалов, производства и обеспечения качества, и заканчивая обслуживанием, ремонтом и переработкой.

TWI и входящие в него организации-члены работают по всем видам соединений и родственных технологий таким, как резка и наплавка. Все это приводит к росту производительности, повышению качества и надежности продукции, экономии средств, сокращению времени простоя и введению новшеств.

TWI является организацией, работающей по принципу членства. Поскольку в состав TWI входит много промышленных предприятий, это дает уникальные возможности для партнерства сходными фирмами, желающими увеличить производительность и валовую прибыль. Благодаря членству в TWI около 3500 компаний и организаций из более чем 50 стран мира, представляющих практически все отрасли обрабатывающей промышленности, извлекают пользу из аккумулирующего TWI мирового опыта.



Уже более полувека TWI оказывает поддержку большим и малым компаниям в различных отраслях промышленности — это и авиакосмическая промышленность автомобилестроение, строительство, электроника, медицина, добыча нефти и газа, энергетика.

TWI работает по следующим направлениям:

- исследования по контрактам. Конфиденциальная работа с клиентами по широкому спектру проблем: проекты, поддерживаемые группой и имеющие общую цель, и совместные проекты, в которых принимают участие несколько научно-исследовательских организаций, проводящих сходную политику, обычно при поддержке Европейского Сообщества;

- основные исследования. Программы с многомиллионными инвестициями, по основным способам соединения всех машиностроительных материалов, а также участие в разработке стандартов;

- информационная поддержка. В глобальной сети TWI предоставляет доступ ко всем услугам, оказываемым промышленному сектору. Автопоиск опубликованных работ доступен с помощью поисковой службы Weldaserch. У TWI самая большая в мире библиотека публикаций по соединению и резке. Имеется техническая служба, которой руководят инженеры-сварщики, а также возможна помочь более 200 экспертов по технологиям соединения;

- консультирование и поддержка проектов. Эти услуги включают технические советы по проектированию, надежности и выбору материалов, а также ведущий мировой опыт в области соединения и родственных технологий, усовершенствования технологий производства;

- передача технологий. На сайте TWI представлена наиболее полная в мире интерактивная техническая база данных по соединению материалов. Конференции и семинары собирают в А宾гтоне специалистов всего мира;

- обучение и аттестация. Работают курсы по всем процессам соединений и контроля, охватывающие практический контроль вплоть до обучения аспирантов и их сертификации и предоставления определенных квалификационных схем. TWI также руководит Обществом по сварке и отделением, которое координирует работу организаций-членов TWI по специализированным направлениям.

#### **Создание и использование новых технологий.**

За время существования TWI были разработаны такие способы сварки и процессы, как импульсная сварка МИГ, электронно-лучевая сварка пучком высокой мощности, сварка трением с перемешиванием, лазерная резка, термокомпрессионная сварка шариком, электронно-лучевая сварка при пониженном давлении, испытание широких листов по Уэллсу, правила расчета усталости, теория механики разрушения, дистанционное тестирование ультразвуком, исследования по образованию трещин в зоне термического влияния под действием водорода, линейная сварка трением и наплавка трением.

Большой интерес представляют новые технологии TWI, которые появились буквально недавно,

например, Vytresyn® — новый прозрачный материал для наплавки, Barricade®, термоизоляционный продукт, AdhFAST® — новый способ соединения, предполагающий использование как связующих веществ, так и механических крепежей, и ClearWeld™ — способ соединения для пластиковых упаковок и одежды.

Более традиционные области промышленности также извлекли пользу из изобретений TWI, например, сварка трением с перемешиванием нашла применение в авиакосмической промышленности, автомобилестроении и производстве высококачественных динамиков. Новые методы контроля, например, системы контроля TWI с оценкой степени риска, поддерживаемые программным обеспечением Reskwisse™, используются во всем мире.

TWI использует свою интеллектуальную собственность каждый день путем продажи ноу-хау и опыта организациям-членам TWI во всем мире, а также принимая участие в различных финансировемых научно-исследовательских проектах. В TWI разработаны новые идеи и изобретения, например, лазер CO<sub>2</sub>, лазерная резка в защитном газе и СТОД (раскрытие в вершине трещины), которые впоследствии получили промышленное применение.

До 1990 г. использование TWI интеллектуальной собственности не было активным, т. е. он владел патентами, стоимость поддержания которых превышала поступления от выдачи лицензии. Это вызвало необходимость в разработке стратегии использования интеллектуальной собственности. TWI начал накапливать опыт защиты и использования идей других подобных организаций, существующих на рынке, патентных поверенных, органах, имеющих право на выдачу лицензии, участвовал в конференциях и семинарах по вопросам интеллектуальной собственности. Это привело к тому, что с учетом размеров TWI и имеющихся у него ресурсов патентами и/или торговыми марками защищается только интеллектуальная собственность, наследшая, применение в промышленности. Кроме того, был оформлен поэтапный процесс управления изобретениями. В результате с 1996 г. поступления от выдачи лицензии стали превышать расходы. В настоящее время TWI разрабатывается 28 новых изобретений.

Таким образом, TWI находится на переднем рубеже технологий сварки и соединения, предполагает, что именно эта деятельность останется основой его бизнеса в будущие годы. TWI предоставляет организациям-членам по всему миру услуги и информацию по всем видам производства, в его стенах разработано большое количество процессов и методов, которые стали неотъемлемой частью производства. На сегодня бизнес TWIпрочно стоит на ногах и открывает для себя новые возможности в менее традиционных областях. TWI предполагает расширять свою территорию близ Кембриджа, основать филиалы в других районах Великобритании и там, где возникнет необходимость в предоставлении услуг мирового класса для удовлетворения нужд организаций-членов TWI по всему миру.

*В связи с 90-летием со дня рождения крупного ученого в области металлургии сварки цветных металлов, заслуженного деятеля науки и техники УССР, лауреата премии им. Е. О. Патона, д-ра техн. наук, проф. Даниила Марковича Рабкина и 40-летием отдела сварки легких металлов и сплавов, которым Д. М. Рабкин руководил с 1962 до 1987 г., редакция журнала предлагает читателям тематическую подборку статей сотрудников отдела, который в настоящее время возглавляет д-р техн. наук, чл.-кор. НАН Украины А. Я. Ищенко. В ней освещаются этапы развития и современное состояние исследований и разработок по актуальным вопросам сварки алюминиевых сплавов. Рассмотрены результаты экспериментальных исследований физических и металлургических явлений, происходящих при дуговой и электронно-лучевой сварке, технологические особенности сварки плавлением новыми способами, металловедческие вопросы, касающиеся свариваемости высокопрочных алюминиевых сплавов, а также механические свойства сварных соединений новых алюминиевых сплавов в различных условиях эксплуатации.*

*От редакции*

УДК 621.791

## ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ В ИЭС им. Е. О. ПАТОНА

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

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, сварка, направление исследований, разработанные технологии

В современном машиностроении широкое применение находят алюминий, сложнолегированные сплавы и композиты на его основе. Они обеспечивают развитие многих областей промышленного производства, главным образом транспортного машиностроения, где высокопрочные легкие материалы используются особенно эффективно.

В Украине, как и в других промышленно развитых странах, 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.

Следует отметить значительные трудности, возникающие при сварке плавлением высокопрочных алюминиевых сплавов, связанных 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 высокопрочных алюминиево-литиевых сплавов, кото-

рые, благодаря низкой плотности и повышенному модулю жесткости, позволяют на 10...15 % уменьшить массу конструкций и соответственно повысить грузовместимость пассажирских и транспортных самолетов и других транспортных средств.

Современные требования к материалам и технологиям их сварки все время повышаются. Поэтому руководство Института электросварки им. Е. О. Патона постоянно заботится о развитии исследований и разработке более эффективных технологий, оборудования, сварочных материалов для производства конструкций из легких сплавов. Созданный в институте специализированный отдел физико-металлургических процессов сварки легких металлов и сплавов за 40 лет своей деятельности внес значительный вклад в решение актуальных вопросов сварочной науки и техники. В частности, улучшены характеристики свариваемости некоторых сплавов, получены новые сварочные материалы, в том числе эффективные присадочные проволоки с цирконием и скандием, созданы рациональные конструкции сварных узлов, разработаны технологические процессы дуговой и электронно-лучевой сварки и необходимое для этого оборудование. Все это обеспечило высокое качество сварных соединений, надежность их эксплуатации, содействовало росту производительности сварки и уменьшению металлоемкости изделий.

Первым руководителем отдела в период с 1962 по 1987 гг. был Даниил Маркович Рабкин, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники УССР. Среди основных

направлений деятельности отдела — исследование свариваемости алюминиевых и магниевых сплавов, разработка технологии сварки конструкций различного назначения, включая создание специализированного оборудования и сварочных материалов. Научно-технические разработки отдела широко внедрены на многих предприятиях машиностроительного комплекса при изготовлении котлов, железнодорожных цистерн и стационарных емкостей, оборудования для химического производства и пищевой промышленности, вагонов метро, скоростных пассажирских вагонов, грузовых автомобилей и самосвалов, авиационной и ракетно-космической техники, а также при ремонте сельскохозяйственных машин и автотранспорта.

В настоящее время высококвалифицированные специалисты в областях металлургии и металловедения, технологии сварки легких сплавов и металлических композиционных материалов, используя современное сварочное и исследовательское оборудование, выполняют научные исследования для решения таких проблемных вопросов, как:

свариваемость различными способами новых конструкционных материалов на основе алюминия и магния, композиционных материалов с алюминиевой матрицей и разнородных материалов;

природа сварочных горячих трещин и разработка методов предотвращения их при сварке новых высокопрочных сложнолегированных сплавов, включая сплавы алюминия и магния с литием;

взаимодействие сварочной ванны с газами, разработка методов дегазации расплавленного металла и оценка влияния пористости сварных соединений на их служебные свойства;

структурные превращения в шве и в зоне термического влияния сварки, их влияние на свойства соединений;

повышение характеристик прочности и надежности сварных соединений в различных условиях эксплуатации.

В числе основных технологических разработок следует отметить наиболее эффективные способы сварки и примеры использования их в промышленном производстве конструкций различного назначения:

сварку пульсирующей дугой неплавящимся электродом алюминиево-литиевых и других высокопрочных легких сплавов различных систем легирования, применительно к изготовлению ответственных изделий. Технология обеспечивает улучшение качества швов и повышение их прочности на 10...15 %;

импульсно-дуговую сварку плавящимся электродом тонколистовых конструкций (1...4 мм) для изготовления и ремонта лодок, катеров, надстроек судов, оборудования для пищевой и химической

промышленности, автоцистерн, трубопроводов и др. Технология обеспечивает высокую производительность процесса, уменьшение деформаций конструкций и себестоимости сварки;

электрошлаковую сварку узлов алюминиевых шинопроводов и заготовок большого сечения (толщиной 50...200 мм) в стационарных условиях и на монтаже. Электросопротивление в зоне соединения не превышает сопротивления основного металла и отличается высокой стабильностью;

электронно-лучевую сварку и наплавку алюминиевых сплавов для изготовления крупногабаритных оболочек и емкостей, стрингерных панелей для строительства судов, самолетов, ракет и космической техники, конструкций теплообменной аппаратуры, поршней с полостями охлаждения и с упрочненными канавками под кольца, бытовой техники и приборов. Технология обеспечивает высокое качество и стабильность механических свойств неразъемных соединений толщиной от 0,5 до 350 мм;

соединение различными способами разнородных металлов (алюминия и его сплавов со сталью, медью и другими металлами), композиционных материалов на алюминиевой основе с волокнистым (сталь, карбид кремния, углерод, бор) и дисперсным (оксиды, карбиды, интерметаллиды) упрочнением. Технологии сварки и пайки таких материалов используются в судостроении, автомобилестроении, авиакосмической технике, электротехнике.

Ведутся работы, направленные на создание сварочных проволок (присадок), содержащих высокоэффективные модификаторы (титан, цирконий, скандий), которые обеспечивают высокие технологические и прочностные характеристики соединений алюминиевых сплавов. Разработаны эффективные штучные алюминиевые электроды серии УНА для ремонтной сварки и наплавки деталей и конструкций из деформируемых и литьевых алюминиевых сплавов. Состав флюсовых покрытий и технология изготовления разработанных электродов обеспечивают им сварочно-технологические свойства на уровне лучших зарубежных аналогов.

Отдел постоянно предоставляет консультации, аргументированные заключения, выполняет экспертизу проектов сварных конструкций на технологичность, проводит обучение и стажировку специалистов, принимает непосредственное участие в организации производства изделий из легких сплавов на промышленных предприятиях.

Лучшие оригинальные разработки сотрудников отдела сварки легких металлов и сплавов постоянно реализуются в форме контрактов и конкурсных проектов, отмечены многими авторскими свидетельствами на изобретения (более 200), четырьмя государственными премиями.

Поступила в редакцию 04.10.2002

# РАЗВИТИЕ СПОСОБОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ

**И. В. ДОВБИЩЕНКО, Б. А. СТЕБЛОВСКИЙ,** кандидаты техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Освещена история создания и совершенствования способов и технологий дуговой сварки алюминия и его сплавов в отделе физико-металлургических процессов сварки легких металлов и сплавов ИЭС им. Е.О.Патона. Отмечена роль института в освоении технологий сварки конкретных изделий.

*Ключевые слова:* алюминиевые сплавы, дуговая сварка по флюсу, инертные газы, флюсы, вольфрамовые, покрытые электроды, сварочное оборудование

Научные исследования и инженерные разработки в области сварки алюминия и его сплавов были начаты под руководством Д. М. Рабкина в Институте электросварки им. Е. О. Патона в 1951 г. в лаборатории сварки цветных металлов и сплавов, которая с 1962 г. преобразована в отдел. Требовалось в сжатые сроки организовать поточное производство цистерн из сплава АМц толщиной 18...20 мм для перевозки и хранения жидкого кислорода, используемого для ракетных комплексов.

В 1951–1952 гг. Д. М. Рабкиным разрабатываются новый способ автоматической однодуговой сварки полуоткрытой дугой (по слою флюса) и флюс марки АН-А1 [1]. Он отличается от известного способа сварки стали под флюсом наличием тонкого слоя флюса впереди дуги. Модернизируется сварочное оборудование — трактор ТС-17 и головка АБС. В 1952–1953 гг. процесс был освоен на Уралвагонзаводе (г. Нижний Тагил) [2], где применялся более 30 лет. Способ сварки обеспечил не только необходимые качество металла шва и механические свойства соединений, но и высокую производительность процесса. Стыковые соединения сваривали с двух сторон, без разделки кромок со скоростью 15...16 м/ч.

Попытки использовать в то время на заводе сварку в инертных газах не дали положительных результатов, так как соединение металла толщиной 18...20 мм приходилось выполнять в разделку кромок за несколько проходов, требовалась (в отличие от сварки по флюсу) тщательная подготовка поверхности свариваемых кромок и проволоки. Кроме того, аргон высокой чистоты и тем более гелий были дефицитные и дорогие. Имелось также значение и несовершенство оборудования того времени.

В 1956–1959 гг. способ сварки по флюсу совершенствуется. В работах принимают участие М. Л. Звонков, Б. А. Стебловский, И. В. Довбященко, М. П. Порицкий. Применительно к металлу толщиной 12...22 мм разрабатывается технология сварки расщепленным электродом с общим токоподводом к обеим проволокам (двуухэлектродная сварка) [3], что дало возможность выполнять первые внутренние швы — продольные и коль-

цевые на флюсовой подушке, а вторые наружные швы — на весу. Отпала необходимость устанавливать тяжелые стальные подкладки внутри котла, снизились требования к сборке.

Во второй половине 1950-х — начале 1960-х гг. автоматическая сварка по флюсу марки АН-А1 занимает ведущее положение в массовом производстве алюминиевых стационарных емкостей вместимостью от 2 до 100 м<sup>3</sup> на заводах «Большевик» (г. Киев), «Красный Октябрь» (г. Фастов), Сумском машиностроительном и ряде других [4, 5], а котлов железнодорожных цистерн на Мариупольском ПО «Азовмаш» [6]. Котлы и емкости предназначались для хранения и транспортировки пищевых и химических продуктов — воды, молока, азотной кислоты, ракетного топлива и др. Выполняются соединения алюминиевых шин. На Кузнецком заводе металлоконструкций изготавливается уникальная вентиляционная труба из сплава АМц диаметром 6 м и высотой 100 м [7]. Для автоматической сварки по флюсу в ИЭС им. Е. О. Патона разрабатывается специализированное оборудование — сварочные трактора ТС-31, ТС-33 и ТС-36, подвесной аппарат А-586.

Для механизированной и ручной дуговой сварки низколегированных алюминиево-магниевых сплавов был разработан флюс АН-А4 и электроды АН-А103, которые обеспечивали прочность соединений сплавов АМг3 и АМг5 не меньше 85...90 % прочности основного металла [8].

На этой основе в последние годы в ИЭС им. Е. О. Патона созданы новые электроды серии УНА [9], предназначенные для сварки и наплавки деталей и конструкций из деформируемых и литьевых алюминиевых сплавов широкой номенклатуры. Состав покрытия и технология изготовления электродов обеспечивают им сварочно-технологические свойства на уровне лучших зарубежных аналогов.

В 1960-х — 1970-х гг. алюминиевые сплавы все шире используются в ракетно-космической технике, судостроении, танкостроении, вагоностроении, химической промышленности, строительстве и других отраслях.

Попытки применить сварку по флюсу для высоколегированных алюминиевых сплавов не дали положительных результатов — не обеспечивалось требуемое качество швов и необходимые свойства

соединений. При сварке металла толщиной выше 18...20 мм увеличивалась опасность образования шлаковых включений и пор в швах, повышались требования к соблюдению санитарно-гигиенических условий труда. Указанные обстоятельства обусловили интенсивную разработку и совершенствование эффективных способов и технологий сварки в инертных газах и электронным лучом. Работы по этим направлениям велись параллельно, что позволяло гибко выбирать различные варианты технологии в зависимости от требований к изделиям, условиям их производства и эксплуатации.

Среди способов сварки в инертных газах алюминиевых сплавов в конце 1950-х – начале 1960-х гг. ведущее положение занимала аргонодуговая сварка неплавящимся электродом переменным током синусоидальной формы. Она позволяла получать по сравнению со сваркой плавящимся электродом в аргоне более высокие качество металла шва и механические свойства соединений. Однако проплавляющая способность дуги ограничивалась недостаточной стойкостью электродов из торированного вольфрама. Автоматическую сварку металла толщиной выше 8...10 мм приходилось выполнять со скосом кромок за несколько проходов.

В результате совместных исследовательских работ с Московским заводом электровакуумных приборов, проводимых с начала 1960-х гг. Д. М. Рабкиным и О. Н. Ивановой, были получены радиационно безопасные активированные вольфрамовые электроды с присадкой до 1,5...2,0 % оксида лантана – ЭВЛ и до 3,5 % оксида иттрия – ЭВИ [10]. Электроды изготавливают по ГОСТ 23949–80. Дальнейшие исследования с участием Б. А. Стебловского и В. П. Будника позволили определить допустимые значения постоянного и переменного тока в зависимости от марки и диаметра электрода. Положительное влияние активирующей присадки наиболее полно проявляется при сварке на постоянном токе прямой полярности и на переменном токе при сдвиге тока в сторону прямой полярности [11].

Электроды ЭВЛ не уступают торированным по расходу, допустимой плотности тока и широко используются для ручной и автоматической сварки переменным и постоянным током. Итрированные электроды позволили увеличить плотность мощности в дуге в 1,5...2,0 раза без опасного перегрева электродов и добиться существенного повышения эффективности плавления свариваемого металла. С помощью итрированных электродов диаметром 10 мм получена возможность сваривать за один проход однофазной высокоамперной дугой (до 900...1000 А) алюминиевые сплавы толщиной 18...20 мм, а трехфазной дугой – 30...40 мм. Разработано сварочное оборудование. Значительно расширилась область использования сварки неплавящимся электродом. Уже к середине 1960-х гг. технология автоматической сварки высокоамперной дугой корпусных изделий ракет-носителей из сплава АМгб осваивается совместно с работниками Куйбышевского завода «Прогресс», монтажно-испытательного комплекса в Байконуре, Южного ма-

шиностроительного завода, г. Днепропетровска и др.

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 встречаются недопустимые включения оксидной плены. Идея интенсификации перемешивания металла сварочной ванни с целью измельчения оксидных включений и одновременно его дегазации была реализована при сварке неплавящимся электродом пульсирующей дугой. Работы в этом направлении начаты в конце 1960-х гг. Д. М. Рабкиным, Н. М. Воропаевым, В. А. Мишенковым [12, 13]. Были созданы опытные источники асимметричного тока типа ОАРС.

Дальнейшее изучение процесса при пульсирующем силовом воздействии дуги на сварочную ванну алюминиевых сплавов, выполненное А. Я. Йщенко, А. Г. Чаюном, Р. В. Илющенко, А. Г. Покляцким [14, 15] позволило установить эффективные области его использования, создать специализированное сварочное оборудование (источники И-126, И-160).

В результате изменения амплитудных значений тока прямой и обратной полярности (асимметричный ток) удалось уменьшить в 3 раза относительную протяженность включений оксидной плены в сварных швах сплава АМгб и вероятность образования ее протяженных включений в швах литийсодержащих сплавов 1420 и 1460. Большие перепады амплитуды в период импульса и паузы (модулированный ток) обеспечивают снижение в 7...10 раз суммарного объема пустот в сварных соединениях сплавов 1420 и 1460 [16].

Использование термически упрочняемых и нагартованных сплавов алюминия потребовало применения способов сварки с концентрированными источниками нагрева, которые обеспечивают достаточную глубину проплавления при сравнительно малом тепловложении. К таким способам дуговой сварки относятся микроплазменная сварка [17], плазменно-дуговая переменным током, гелиево-дуговая постоянным током вольфрамовым электродом и плавящимся электродом в инертных газах.

Исследования, проведенные И. В. Довбиценко, А. Г. Покляцким, А. П. Запарованим и др., показали эффективность применения переменного асимметричного тока прямоугольной формы для плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов [18]. Время протекания тока обратной полярности, достаточное для катодной очистки поверхности металла, составляет 25...30 % общего цикла, благодаря чему снижается нагрузка на вольфрамовый электрод. В периоды прямой полярности достигается более глубокое проплавление основного металла. В результате повышается скорость сварки, снижается погонная энергия, уменьшаются масса и габариты плазмотрона. Возможность формирования обратной стороны шва «на весу» при сквозном проникновении дуги обеспечивает вынос на поверхность обратной стороны шва не разрушенных дугой оксидных плен и удаление газов из



Рис. 1. Орбитальный самолет «Буран»

расплавленного металла. Разработаны опытный источник питания И-196, плазмотрон ПД-154.

Научно-технологические исследования по разработке оборудования, аппаратуры управления и технологии сварки неплавящимся электродом постоянным током прямой полярности в гелии — гелиево-дуговой сварки относятся к началу 1970-х гг. (Д. М. Рабкин, О. Н. Иванова, В. П. Будник, Б. А. Стебловский).

Более высокая концентрация тепловой энергии при гелиево-дуговой сварке по сравнению со сваркой вольфрамовым электродом переменным током в аргоне способствует повышению проплавляющей способности дуги, снижению в 1,5...2,0 раза потенциальной энергии и соответственно уменьшению зоны термического влияния термообрабатываемых сплавов [19, 20].

Указанные обстоятельства определили широкое производственное внедрение процесса на предприятиях авиационно-космической техники при изготовлении конструкций из алюминиевых сплавов АМг6, 1201, в том числе изделий «Энергия» и кабина орбитального самолета «Буран» (рис. 1). Данная технология используется и в настоящее время.

Способ сварки плавящимся электродом (в отличие от сварки неплавящимся электродом) менее чувствительный к размерам зазора и превышению толщины соединяемого металла, обеспечивает более высокую скорость сварки и незначительный уровень остаточных деформаций в соединениях. Тем не менее, нестабильное качество швов, получаемых при



Рис. 3. Автосамосвал МАЗ-5551

сварке стационарной дугой в аргоне, ограничивало применение этого способа выполнением угловых и нахлесточных соединений, где он удобен [21].

Разработка в ИЭС им. Е. О. Патона способа импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом [22] явилась значительным достижением в области сварки плавлением. Технологические исследования процесса импульсно-дуговой сварки с использованием первых генераторов импульсов тока ИИП-1 [23], а затем и других источников питания [24], в которых участвовали сотрудники отдела Б. А. Стебловский, М. П. Пацуля, В. Г. Игнатьев и др., позволили определить преимущества способа при сварке алюминиевых сплавов. Помимо повышения стабильности горения дуги, значительно уменьшилось разбрызгивание металла и испарение легколетучих элементов, снизилось количество и размеры оксидных включений и пор в швах.

Благодаря этому с середины 1960-х гг., импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом находит все более широкое применение в промышленности. Она использовалась при изготовлении корпусных конструкций ракетных комплексов на Куйбышевском и Оренбургском заводах, корпусов легких десантируемых танков на Волгоградском заводе, узлов пассажирских железнодорожных вагонов [25] (рис. 2) и вагонов метро [26], самосвальных платформ автомобилей [27] (рис. 3), автомобильных рефрижераторов, надстроек судов, строительных конструкций и других изделий.



Рис. 2. Головной вагон скоростного электропоезда ЭР-200



Рис. 4. Железнодорожная цистерна для перевозки химических агрессивных продуктов



Рис. 5. Боевая машина пехоты

Высокие требования, предъявляемые к сварным соединениям емкостей из сплава АМцС и технического алюминия толщиной 20...30 мм для хранения и перевозки агрессивных продуктов, привели к разработке высокоеффективной технологии сварки плавящимся электродом диаметром 3...4 мм стационарной дугой в смеси инертных газов — гелия и аргона (Д. М. Рабкин, И. В. Довбищенко, В. С. Бугай, В. С. Машин). Использование гелий-argonовых смесей позволяет не только уменьшить в 2...8 раз объем пустот в наплавленном металле, повысить механические свойства и коррозионную стойкость сварных соединений, но и увеличить на 40...60 % скорость сварки [28, 29].

Эта технология была успешно реализована при изготовлении емкостей из сплава АМцС на Балашихинском ПО «Криогенмаш» [30], поточном производстве алюминиевых котлов железнодорожных цистерн [31] (рис. 4) и корпусных элементов ракет из сплава АМгб [32] на ПО «Азовмаш». Сварка плавящимся электродом диаметром 3 мм в одном аргоне была внедрена на Курганском машиностроительном заводе для изготовления корпусов боевых машин пехоты из алюминиевой брони [33] (рис. 5).

Использование смесей газов при импульсно-дуговой сварке плавящимся электродом диаметром 1,0...1,6 мм позволило получить более высокий уровень механических свойств соединений алюминиево-литиевых сплавов по сравнению со сваркой неплавящимся электродом пульсирующим током [34].

Для соединения толстостенных конструкций ( $\delta_{мет} = 40...150$  мм) из плит, фасонных профилей сплавов АМгб, 1201 Б. А. Стебловским, В. И. Завирюхой, Ю. А. Рябцом разработана технология сварки импульсной и стационарной дугой плавящимся электродом в гелии и его смесях с аргоном в узкощелевую разделку кромок. Способ позволяет получить соединения в нижнем положении и на вертикальной плоскости. Сварка плавящимся электродом в узкий зазор по сравнению со сваркой в широкую X-образную разделку свариваемых кромок позволяет сократить в несколько раз количество проходов, уменьшить зону термического влияния в 4...6 раз и уровень остаточных деформаций, экономятся сварочные материалы и

электроэнергия [35]. Процесс нашел применение в опытно-промышленном производстве узлов корпусов ракет на заводе «Прогресс» и корпусов боевых машин пехоты на Курганском машиностроительном заводе [33].

Снижение стоимости выполнения сварочных работ возможно за счет замены гелия в качестве защитного газа на готовые гелий-неоновые смеси ( $Ne = 3\dots25\%$ ), получаемые в Украине [36]. Стоимость 1 м<sup>3</sup> таких смесей в среднем на 25 % ниже чистого гелия.

Для сварки плавящимся электродом в ИЭС им. Е. О. Патона разработано оборудование — подвесные самоходные аппараты А-1002, А-1431, автоматы серии АД-238, сварочные трактора А-1012, ТС-56, сварочная установка УД-474 для сварки конструкций штампосварочных катков из сплава АМгб для боевых машин пехоты, полуавтоматы ПШ-128, ПШ-144 и др.

В настоящее время в отделе проводятся исследования, нацеленные на комбинированное использование двух или более источников тепла, в том числе лазерного пучка с целью повышения производительности процесса улучшения качества соединений.

1. Рабкин Д. М. Новый способ автоматической сварки алюминия // Автомат. сварка. — 1953. — № 4. — С. 45–50.
2. Рабкин Д. М. Автоматичне зварювання алюмінію та його сплавів // Вісн. АН УРСР. — 1955. — № 7. — С. 41–44.
3. Рабкин Д. М., Звонков М. Л. Автоматическая сварка алюминия расщепленным электродом // Автомат. сварка. — 1958. — № 5. — С. 25–31.
4. Рабкин Д. М. Автоматическая сварка котлов из алюминия и его сплавов // Передовой научн.-техн. и производств. опыт. — 1958. — Вып. 1. — С. 15–19.
5. Довбищенко И. В., Свенцицкий В. Г. Опыт автоматической сварки алюминиевых сосудов объемом 2 м<sup>3</sup> // Автомат. сварка. — 1958. — № 8. — С. 89–92.
6. Антонец Д. П., Довженко А. Ф. Поточная линия изготовления емкостей из алюминия // Там же. — 1965. — № 2. — С. 64–66.
7. Порицкий М. П., Стебловский Б. А., Народницкий Б. И. Опыт сварки алюминиевой вентиляционной трубы // Там же. — 1965. — № 1. — С. 61–63.
8. Рабкин Д. М., Звонков М. Л., Верченко В. А. Опыт изготовления сварных емкостей из алюминиево-магниевого сплава // Там же. — 1958. — № 4. — С. 84–88.
9. Скорина Н. В., Машин В. С. Покрытые электроды для ручной дуговой сварки алюминия и его сплавов // Сварщик. — 2000. — № 2. — С. 26.
10. Влияние присадки окислов некоторых редких и редкоземельных металлов на свойства вольфрамовых электродов // Д. М. Рабкин, О. Н. Иванова, С. И. Ипатова и др. // Автомат. сварка. — 1964. — № 4. — С. 5–9.
11. Иванова О. Н., Рабкин Д. М., Будник В. П. Допустимые значения тока при аргонодуговой сварке вольфрамовыми электродами // Там же. — 1972. — № 11. — С. 38–40.
12. Рабкин Д. М., Воропай Н. М., Мишенков В. А. Аргонодуговая сварка алюминиевых сплавов при прямоугольной форме кривой переменного тока // Там же. — 1968. — № 7. — С. 74–75.
13. Рабкин Д. М., Воропай Н. М., Мишенков В. А. Энергетические характеристики процесса сварки на асимметричном разнополярном токе // Там же. — 1978. — № 4. — С. 5–10.
14. Ищенко А. Я., Чаюн А. Г., Илющенко Р. В. Свариваемость и технология дуговой сварки сплава системы алюминий–магний–литий // Там же. — 1985. — № 10. — С. 47–49.
15. Ищенко А. Я., Покляцкий А. Г., Яворская М. Р. Предотвращение включения оксидной пленки в швах при аргонодуговой сварке алюминиевых сплавов // Там же. — 1989. — № 6. — С. 38–41.
16. Покляцкий А. Г., Гринюк А. А. Влияние параметров асимметричного и модулированного токов на качество сварных

- соединений алюминиевых сплавов // Там же. — 2001. — № 7. — С. 33–36.
17. *Микроплазменная сварка легких металлов и сплавов с катодным распылением окисных пленок* / Н. М. Воропай, В. С. Гвоздецкий, В. В. Щербак, Л. М. Яринич // Там же. — 1969. — № 7. — С. 5–10.
18. *Сварка алюминиевых сплавов плазменной дугой на переменном токе* / Е. Ю. Брик, И. В. Довбищенко, А. П. Запаровский и др. // Там же. — 1992. — № 4. — С. 53–54.
19. *Сварка алюминиевых сплавов на постоянном токе прямой полярности* / Д. М. Рабкин, О. Н. Иванова, Б. А. Стебловский и др. // Там же. — 1971. — № 3. — С. 71–72.
20. *Свойства соединений алюминиевых сплавов, выполненных сваркой на постоянном токе прямой полярности* / О. Н. Иванова, А. В. Лозовская, Д. М. Рабкин и др. // Там же. — 1973. — № 3. — С. 8–11.
21. *Рабкин Д. М., Савич И. М., Рождественская Т. С. Опыт изготовления цельнометаллического пассажирского алюминиевого вагона* // Там же. — 1962. — № 2. — С. 60–65.
22. *Патон Б. Е., Потальевский А. Г., Подола А. В. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с программным регулированием процесса* // Там же. — 1964. — № 1. — С. 1–6.
23. *Импульсно-дуговая сварка алюминиевых сплавов в аргоне* / В. Ф. Лапчинский, А. Г. Потальевский, Б. А. Стебловский и др. // Там же. — 1966. — № 7. — С. 50–54.
24. *Опыт применения оборудования и технологий импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом изделий из алюминиевых сплавов* / П. П. Шейко, Н. Н. Слепченко, М. П. Пашуля и др. // Актуальные проблемы сварки цветных металлов: Докл. I Всесоюз. конф. Киев, 21–23 нояб. 1978 г. — Киев: Наук. думка, 1980. — С. 170–174.
25. *Сварка кузова вагона электропоезда ЭР-200* / Д. М. Рабкин, М. П. Порицкий, Б. А. Стебловский и др. // Автомат. сварка. — 1975. — № 9. — С. 48–51.
26. *Конструктивно-технологические особенности изготовления сварного кузова вагона метро из алюминиевых сплавов* / В. Г. Игнатьев, Л. М. Лобанов, Д. М. Рабкин и др. // Там же. — 1984. — № 2. — С. 51–53.
27. *Алюминиевая платформа самосвала БелАЗ-7510* / Д. М. Рабкин, М. П. Порицкий, Б. А. Стебловский и др. // Там же. — 1980. — № 3. — С. 68–69.
28. *Рабкин Д. М., Рябов В. Р., Довбищенко И. В. Применение гелия и его смеси с аргоном при сварке алюминиевых сплавов* // Там же. — 1963. — № 9. — С. 1–6.
29. *Довбищенко И. В., Ищенко А. Я., Машин В. С. Применение гелия при сварке алюминиевых сплавов плавящимся электродом* // Там же. — 1997. — № 2. — С. 14–15.
30. *Сварка сосудов из алюминиевого сплава* / И. В. Довбищенко, Д. М. Рабкин, В. С. Бугай и др. // Там же. — 1967. — № 5. — С. 61–62.
31. *Сварка алюминиевых котлов плавящимся электродом в гелиево-argonовой смеси* / А. В. Цыплюхин, А. М. Новиков, В. М. Бороденко и др. // Там же. — 1986. — № 10. — С. 54–56.
32. *Сопоставление технологий сварки сплава AMg6 плавящимся электродом в гелиево-аргоновой смеси и трехфазной дугой в аргоне* / В. С. Машин, Н. Н. Слепченко, В. М. Бороденко и др. // Сварка цветных металлов: Сб. науч. трудов. — Киев: Наук. думка, 1989. — С. 36–39.
33. *Патон Б. Е., Гордонный В. Г. Работы Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины в области танкостроения* // Автомат. сварка. — 2002. — № 2. — С. 33–39.
34. *Повышение прочности швов при дуговой сварке сплава 1420 с применением скандийсодержащих присадок* / А. Я. Ищенко, А. В. Лозовская, А. Г. Покляцкий и др. // Там же. — 2002. — № 1. — С. 11–15.
35. *Технологические особенности сварки плавящимся электродом алюминиевых сплавов больших толщин в узкощелевую разделку* / В. И. Завириюха, Ю. А. Рябец, В. А. Стебловский и др. // Актуальные проблемы сварки цветных металлов: Докл. II Всесоюз. конф. Ташкент, окт. 1982 г. — Киев: Наук. думка, 1985. — С. 79–81.
36. *Влияние состава защитных газов на технологические характеристики дуги при сварке алюминиевых сплавов плавящимся электродом* / А. Я. Ищенко, В. П. Будник, А. Г. Покляцкий и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 2. — С. 19–22.

History of development and upgrading of methods and technologies of arc welding aluminium and its alloys by the Department for Physical-Metallurgical Processes of Welding Light Metals and Alloys at the E.O.Paton Electric Welding Institute is described. The role of the Institute in mastering the technologies for welding specific parts is noted

Поступила в редакцию 30.10.2002

## ВНИМАНИЮ СПЕЦИАЛИСТОВ!

ИЭС им. Е. О. Патона в 2003 г.

проводит международные конференции при информационной поддержке журнала "Автоматическая сварка"



### ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

19—23 мая 2003 г.

Украина, Крым, пос. Кацивели

#### АДРЕС ОРГКОМИТЕТА:

Украина, 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11  
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины  
Тел: (380-44) 261-53-49, 269-26-23  
Факс: (380-44) 268-0486, 274-0277  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
E-mail: kovinvst@sovamua.com  
http://www.nas.gov.ua/pwj

### СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ СВАРКИ И РЕСУРСА КОНСТРУКЦИЙ

24—26 ноября 2003 г.

Украина, г. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ

#### АДРЕС ОРГКОМИТЕТА:

Украина, 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11  
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины  
Факс: (380-44) 268-04-86  
Тел: (380-44) 220-95-78  
E-mail: office@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj



# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ И ДАВЛЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ В СВАРОЧНЫХ ДУГАХ

**Н. М. ВОРОПАЙ**, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изучено радиальное и аксиальное распределение газодинамических характеристик плазменных потоков в сварочных дугах. Форму столба дуги аппроксимировали в виде усеченного конуса с высотой, равной длине дуги, и радиусами верхнего и нижнего оснований, определяемыми как соответствующие размеры светящейся области на кадрах фотосъемки дуги. Сравнение расчетных данных с имеющимися экспериментальными обнаружило удовлетворительное согласование результатов, полученных для скорости и давления плазменных потоков в конкретных сварочных дугах.

**Ключевые слова:** сварочная дуга, плазменные потоки, газодинамическое давление, магнитостатическое давление, контрагирование дуги, асимметричный ток, форма проплавления, алюминиевые сплавы, технология сварки

В сварочных дугах между электродом относительно малого диаметра и основным металлом с развитой поверхностью из-за аксиальных усилий, вызванных градиентом магнитного давления, создаются мощные потоки плазмы и паров металла [1–3]. Технологические возможности процессов дуговой сварки в значительной степени зависят от скорости и давления этих потоков. В связи с высокой температурой сварочных дуг непосредственное изменение скорости и давления дуговых плазменных потоков затруднено, чем и объясняется крайне ограниченное количество работ в этом направлении [2, 4]. Приближенная методика расчетов параметров плазменных потоков в сварочных дугах изложена в работе [5]. Для разработки новых способов дуговой и плазменной сварки необходимо знать зависимость радиального и аксиального распределений газодинамических характеристик плазменных потоков от параметров дуги. Изучению этих вопросов посвящена настоящая статья.

Согласно [6, 7], система магнитогазодинамических уравнений, описывающих движение дуговой плазмы, с учетом допущений, принятых в [5], имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) &= 0; \quad \frac{\partial p}{\partial r} = -j_z B_\phi; \\ \rho \left( v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + j_r B_\phi + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \eta \frac{\partial v_z}{\partial r} \right); \quad (1) \\ \frac{\partial B_\phi}{\partial z} &= -\mu j_z; \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B_\phi) = \mu j_z, \end{aligned}$$

где  $r$  — радиус столба дуги;  $\rho$  — плотность плазмы;  $v_r$ ,  $v_z$  — соответственно радиальная и аксиальная компоненты скорости плазмы;  $p$  — давление;  $j_r$ ,  $j_z$  — соответственно радиальная и аксиальная компоненты плотности электрического тока;  $B_\phi$  — азимутальная компонента вектора магнитной индукции;  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости плазмы;  $\mu$  — магнитная проницаемость.

Применимально к цилиндрической дуге уравнения (1) переходят в уравнения магнитостатики:

$$\frac{dp}{dr} = -j_z B_\phi; \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B_\phi) = \mu j_z. \quad (2)$$

Для решения приведенных уравнений необходимо знать распределение плотности тока в столбе дуги. Согласно [8], примем

$$j_z(r) = j_0 \exp(-a^2 r^2), \quad (3)$$

где  $a^2$  — коэффициент контрагирования дуги, характеризующий скорость убывания  $j_z(r)$  при увеличении координаты  $r$ . Подставив (3) в (2), при условии постоянства полного тока получим

$$I_{cb} = 2\pi \int_0^\infty j_z(r) r dr. \quad (4)$$

Предполагаем, что магнитная проницаемость дуговой плазмы не зависит от координат. Тогда для случая распределения магнитостатического давления в столбе цилиндрической дуги находим

$$p(r) = p_a + \mu \left( \frac{I_{cb}}{2\pi} \right)^2 a^2 [\text{Ei}(-2a^2 r^2) - \text{Ei}(-a^2 r^2)], \quad (5)$$

где  $p_a$  — атмосферное давление;  
 $\text{Ei}(-x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^t}{t} dt$  ( $x > 0$ ) — интегральная показательная функция [9].

Если дуга не цилиндрическая, то возникает аксиальный градиент давления, вызывающий движение дуговой плазмы. Кроме того, на это движение может влиять взаимодействие радиальной компоненты плотности тока с тангенциальным магнитным полем, т. е. член  $j_z B_\phi$  в системе (1). Для определения скорости возникающих при этом плазменных потоков в первом приближении пренебрегаем инерционными членами в третьем уравнении системы (1) и считаем, что электромагнитная сила и градиент давления уравновешиваются силами вязкости. Тогда рассматриваемая система уравнений переходит в следующую:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -j_z B_\phi; \quad (6a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = j_r B_\phi + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \eta \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \quad (66)$$

$$\frac{\partial B_\phi}{\partial z} = -\mu j_r; \quad (6b)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r B_\phi \right) = \mu j_z. \quad (6g)$$

Распределение аксиальной компоненты плотности тока с учетом неоднородности системы вдоль оси  $z$  представим в виде

$$j_z(r, z) = j_0(z) \exp[-a^2(z)r^2] \quad (7)$$

или с учетом (4)

$$j_z(r, z) = (I_{cb}/\pi) a^2(z) \exp[-a^2(z)r^2]. \quad (8)$$

Используя (8), (6a) и (6g), аналогично (5) получаем

$$p(r, z) = p_a + \mu \left( \frac{I_{cb}}{2\pi} \right)^2 a^2(z) \left\{ \text{Ei}[-2a^2(z)r^2] - \text{Ei}[-a^2(z)r^2] \right\}. \quad (9)$$

Используя (6b), член  $j_r B_\phi$  из уравнения (66) представим в виде

$$j_r B_\phi = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial}{\partial z} B_\phi^2. \quad (10)$$

Таким образом, вместо системы (6) имеем

$$\begin{aligned} \mu \left( \frac{I_{cb}}{2\pi} \right)^2 \frac{\partial a^2(z)}{\partial z} \left\{ \text{Ei}[-2a^2(z)r^2] - \text{Ei}[-a^2(z)r^2] \right\} = \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \eta \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

Уравнение (11) необходимо дополнить граничным условием

$$v_z(r, z) \Big|_{r=R_0} = u_0, \quad (12)$$

где  $R_0$  — радиус защитного сопла;  $u_0$  — скорость защитного газа.

Предположим, что вязкость дуговой плазмы не зависит от координат. Тогда решение граничных

**Таблица 1. Изменение функции  $\Phi(x)$  в зависимости от значений  $x$**

$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$
0,01	1,52	0,6	0,34	2,0	-0,70
0,05	1,36	0,7	0,23	2,5	-0,91
0,10	1,20	0,8	0,11	3,0	-1,09
0,15	1,08	0,9	0,03	5,0	-1,61
0,20	0,97	1,0	-0,07	10,0	-2,30
0,25	0,87	1,2	-0,23	15,0	-2,71
0,30	0,76	1,4	-0,38	20,0	-3,00
0,40	0,61	1,6	-0,50	50,0	-3,92
0,50	0,46	1,8	-0,59	100,0	-4,61

Примечание.  $\lim \Phi(x) = c + 1$  (здесь  $c \approx 0,577216$  — постоянная Эйлера—Маскерони).

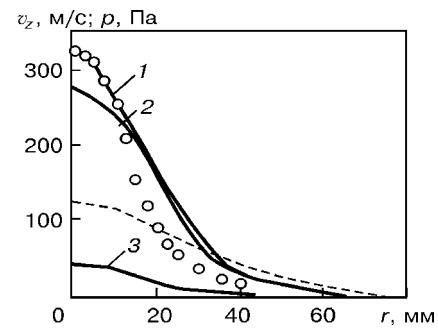


Рис. 1. Радиальное распределение скорости плазменных потоков  $v_z$  (штриховая кривая) и давления  $p$  на аноде аргоновой дуги: 1 — полное давление; 2 — газодинамическое; 3 — магнитостатическое; точки — данные работы [2]

задач (11), (12) после некоторых преобразований принимает вид

$$\begin{aligned} v_z(r, z) = u_0 + \frac{1}{8} \frac{\mu}{\pi} \left( \frac{I_{cb}}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{a^2(z)} \frac{\partial a^2(z)}{\partial z} \times \\ \times \left[ 2[\Phi(a^2(z)R_0^2) - \Phi(a^2(z)r^2)] - \right. \\ \left. - [\Phi(2a^2(z)R_0^2) - \Phi(2a^2(z)r^2)] \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь

$$\Phi(x) = (x+1)\text{Ei}(-x)+\exp(-x)-\ln x. \quad (14)$$

Выражение (13) описывает радиальное и аксиальное распределение скорости плазменных потоков как функцию сварочного тока, коэффициента контрагирования дуги (зависимости его от координат  $z$ ), скорости защитного газа и радиуса защитного сопла. Функция (14), вычисляемая с помощью [10], приведена в табл. 1.

Перейдем к определению газодинамических характеристик плазменных потоков в конкретной сварочной дуге. В случае сварки неплавящимся электродом в аргоне форму столба дуги можно приближенно аппроксимировать в виде усеченного конуса с высотой, равной длине дуги  $l_d$ , и радиусами  $R_1$  и  $R_2$  соответственно верхнего и нижнего оснований, определяемыми как размеры светящейся области на дуге (получено с помощью фотосъемки). Для определения зависимости коэффициента контрагирования конусной дуги от  $z$  воспользуемся соотношением из работы [11] между  $a^2$  и условным радиусом дуги  $R$  (радиус круга, по поверхности которого протекает 95 % тока дуги):

$$a^2(z) = kR^{-2}(z), \quad (15)$$

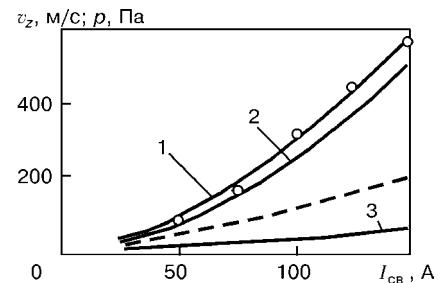


Рис. 2. Зависимости скорости плазменных потоков (штриховая кривая) и давления (сплошные кривые) плазменных потоков на оси анода от сварочного тока при  $l_d = 6$  мм: 1–3 — то же, что и на рис. 1

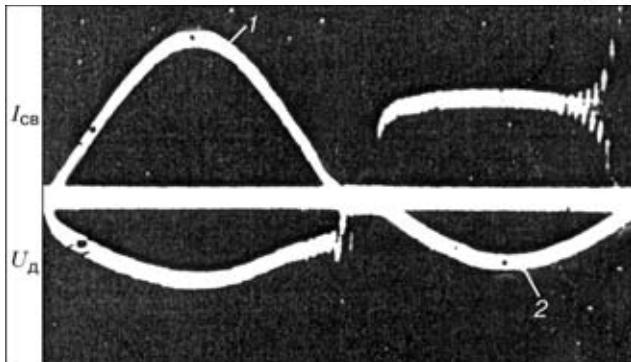


Рис. 3. Осциллограммы асимметричного переменного тока  $I_{cv}$  и напряжения на аргоновой дуге  $U_d$ : 1 — полупериод тока при прямой полярности; 2 — то же при обратной полярности

где  $k$  — безразмерный коэффициент, принимаемый в расчетах равным 3,0...3,5.

Таким образом, для дуги, имеющей форму усеченного конуса

$$R^2(z) = (R_1 + [R_2 - R_1]z/l_d)^2, \quad (16)$$

имеем

$$a^2(z) = \frac{k}{(R_1 + [R_2 - R_1]z/l_d)}. \quad (17)$$

Из выражения (13) следует, что скорость плазменных потоков пропорциональна выражению

$$\frac{1}{a^2(z)} \frac{\partial a^2(z)}{\partial z},$$

которое с учетом (17) можно записать в виде

$$\frac{1}{a^2(z)} \frac{\partial a^2(z)}{\partial z} = \frac{2(R_2 - R_1)}{l_d(R_1 + [R_2 - R_1]z/l_d)}. \quad (18)$$

Вблизи поверхности анода ( $z = l_d$ )

$$v_z - u_0 \sim \frac{1}{l_d} \left( 1 - \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (19)$$

В качестве примера рассмотрим вначале аргоновую дугу постоянного тока с неплавящимся электродом со следующими параметрами [2]:  $I_{cv} = 100$  А;  $l_d = 6$  мм;  $R_1 = 1,3$  мм;  $R_2 = 4,2$  мм;  $u_0 = 2,5$  м/с;  $R_0 = 7,5$  мм;  $\rho = 365$  кг/м<sup>3</sup>;  $\eta = 2,5 \cdot 10^{-4}$  Н·с/м [6]. На рис. 1 показано радиальное распределение скорости плазмы, рассчитанное по выражению (13), магнитостатического (9) и газодинамического  $p_r = \rho v_z^2 / 2$  давлений плаз-

**Таблица 2. Исходные параметры сварочной дуги асимметричного тока, принятые для расчета скорости и давления плазменных потоков**

$\tau$ , мс	$R_1 \cdot 10^3$ , м	$R_2 \cdot 10^3$ , м	$R_1/R_2$	$a^2 \cdot 10^{-5}$ , м <sup>-2</sup>	$I_{cv}$ , А	$v_z$ , м/с	$p_{max}$ , Па
2,5	1,8	8,3	0,22	0,51	81	403	297
5,0	2,0	11,6	0,17	0,26	112	580	612
7,5	1,8	9,5	0,19	0,39	81	409	305
10,0	1,3	3,7	0,35	2,56	182	98	18
12,5	2,0	6,3	0,32	0,88	273	156	45
15,0	1,3	4,3	0,30	1,89	182	106	20

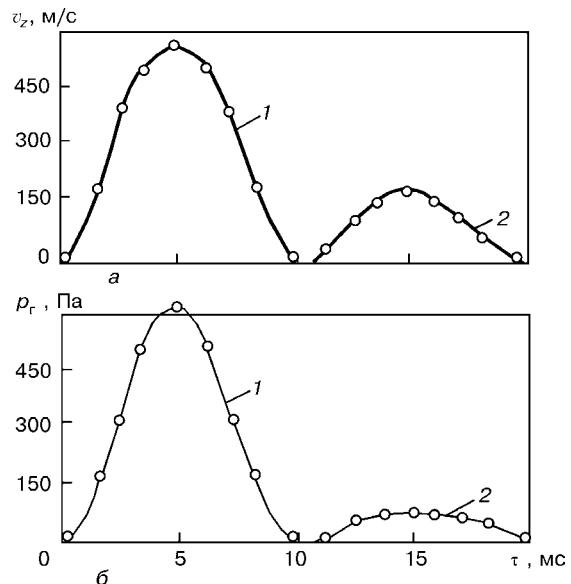


Рис. 4. Изменение газодинамических характеристик плазменных потоков дуги асимметричного переменного тока с  $K_a = 0,8$ : *a* — скорость плазменных точек  $v_z$ ; *b* — газодинамическое давление  $p_r$ ; 1, 2 — полупериод тока соответственно при прямой и обратной полярности

менного потока, а также полного давления, равного сумме магнитостатического и газодинамического давлений. Сравнение полученных расчетных данных  $p_p$  с имеющимися экспериментальными  $p_p$  обнаруживает удовлетворительное совпадение их результатов в центральных областях дуги. Так, на оси анода при  $I_{cv} = 100$  А,  $p_p = 324$  Па, а  $p_p = 320$  Па. Аналогичное совпадение наблюдается в широком диапазоне значений сварочных токов (см. рис. 2). В периферийных областях дуги имеет место некоторое расхождение расчетных и экспериментальных данных. Последнее, по-видимому, объясняется тем, что в приведенной методике расчета не учитывается радиальное растекание потока плазмы вблизи поверхности анода, которое может привести к более быстрому спаду давления в радиальном направлении.

Анализ приведенных данных показывает, что магнитостатическое давление  $p_m$  значительно меньше газодинамического давления плазменного потока  $p_r$ . В центре анода дуги при  $I_{cv} = 100$  А,  $p_m = 44$  Па, а  $p_r = 280$  Па, т. е. почти в 7 раз меньше. Примерно такое же соотношение значений давления наблюдается и при других значениях токов (см. рис. 2). Итак, в конических дугах основную роль в процессе вытеснения жидкого металла сварочной ванны и в проплавлении основного металла играют плазменные потоки. Как видно из (19), для повышения скорости плазменных потоков (увеличения глубины проплавления) необходимо стремиться к уменьшению длины дуги и снижению отношения  $R_1/R_2$ , т. е. к использованию электродов малого диаметра. Во избежание образования дефектов типа сквозных проплавлений, вызываемых механическим воздействием дуги на сварочную ванну, сварку металла малых толщин предпочтительнее выполнять дугой, сужающейся по направлению к изделию («игольчатая» микроплазма).

Исходя из размеров столба дуги, полученных скоростной киносъемкой процесса аргонодуговой сварки алюминиевых сплавов асимметричным переменным током [12], с помощью уравнений (13) и (14) рассчитаны скорости и максимальное давление  $p_{\max}$  плазменных потоков в центральной части дуги в моменты нарастания и спада тока для катодной и анодной частей периода при коэффициенте асимметрии тока  $K_a = 0,8$  (рис. 3 и табл. 2). При амплитудных значениях сварочного тока скорость плазменных потоков достигает 580 м/с. На рис. 4 видны резкие изменения скорости и давления плазменных потоков при переходе с положительной в отрицательную часть периода асимметричного тока. Следовательно, одним из эффективных путей управления глубиной проплавления и формой шва является питание дуги асимметричным разнополярным током. Такая схема питания приводит к периодическому изменению силового воздействия плазменных потоков на металл сварочной ванны, способствует более интенсивному его перемешиванию и дегазации, а также измельчению микроструктуры и диспергированию оксидных включений в металле шва.

Особенно важным является тот факт, что при увеличении коэффициента асимметрии разнополярного тока происходит перераспределение мощности дуги при прямой и обратной полярности с повышением доли тепла, выделяющегося в основной металле, и снижением доли тока, идущего на нагрев электрода. Допустимые токовые нагрузки на вольфрамовые электроды при  $K_a = 0,6 \dots 0,8$  в 1,5...2,0 и 4,0...6,0 раз выше, чем при сварке соответственно на сбалансированном переменном токе и постоянном токе при обратной полярности.

Другим не менее эффективным приемом управления газодинамическими характеристиками плазменных потоков и формой проплавления основного металла являются процессы двухдуговой сварки комбинированными неплавящимися и плавящимися электродами [13] и импульсной сварки двумя плавящимися электродами [14]. В данных случаях за счет раздельной подачи импульсов тока на каждый электрод удается использовать элек-

троды относительно малого диаметра, что приводит к существенному уменьшению отношения  $R_1/R_2$  верхнего и нижнего оснований столба сварочных дуг и соответствующему увеличению глубины проплавления основного металла.

Автор выражает глубокую благодарность канд. физ.-мат. наук И. В. Кривцуну за оказанную помощь в решении системы магнитогазодинамических уравнений, ценные советы и замечания по материалам настоящей статьи.

1. Хренов К. К. Электрическая сварочная дуга. — М.; Киев: Машгиз, 1949. — 204 с.
2. Шоек П. А. Исследование баланса энергии на аноде сильноточных дуг, горящих в атмосфере аргона // Современные проблемы теплообмена. — М.; Л.: Энергия, 1966. — С. 110–139.
3. Заруба И. И. Плазменные потоки в сварочных дугах // Автомат. сварка. — 1968. — № 10. — С. 1–5.
4. Скоростные и тепловые характеристики дуговых потоков // И. М. Ковалев, А. И. Акулов, Л. К. Мартинсон и др. // Физика и химия обраб. материалов. — 1971. — № 5. — С. 27–34.
5. Воропай Н. М., Кривцун И. В. Газодинамические характеристики плазменных потоков в сварочных дугах // Магнитная гидродинамика. — 1978. — № 1. — С. 132–136.
6. Физика и техника низкотемпературной плазмы / Под ред. С. В. Дресвина. — М.: Атомиздат, 1972. — 352 с.
7. Низкотемпературная плазма / В. С. Энгельшт, В. Ц. Гурович, Г. А. Десятков и др. — Новосибирск: Наука, 1990. — Т. 1. Теория столба электрической дуги. — 376 с.
8. Геоздецкий В. С. Контрагирование столба сварочной дуги // Автомат. сварка. — 1974. — № 2. — С. 1–4.
9. Лебедев Н. Н. Специальные функции и их приложения. — М.: Гостехтеориздат, 1953. — 380 с.
10. Таблицы интегральной показательной функции / Под ред. В. А. Диткина. — М.: Изд-во АН СССР, 1954. — 301 с.
11. Геоздецкий В. С. О функции распределения плотности тока в анодном пятне дуги // Автомат. сварка. — 1973. — № 12. — С. 20–24.
12. Рабкин Д. М., Воропай Н. М., Мишенков В. А. Энергетические характеристики процесса сварки на асимметричном разнополярном токе // Там же. — 1978. — № 4. — С. 5–10.
13. Воропай Н. М., Лесных В. В., Мишенков В. А. Комбинированный процесс дуговой сварки и наплавки неплавящимися и плавящимися электродами // Там же. — 1994. — № 4. — С. 56–57.
14. Воропай Н. М., Проценко П. П. Особенности формирования швов и ЗТВ при импульсной двухдуговой сварке в защищенных газах низколегированных сталей повышенной прочности // Там же. — 2000. — № 8. — С. 41–47.

Radial and axial distributions of gas-dynamic characteristics of plasma flows in welding arcs were studied. Shape of the arc column was approximated to that of a truncated cone with height equal to the arc length and radii of the upper and lower bases determined as the corresponding sizes of the glowing region in photos of the arc. Comparison of the calculation data with the experimental ones showed a satisfactory agreement of the results obtained for velocities and pressures of plasma flows in the specific welding arcs

Поступила в редакцию 26.06.2002

# ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В НЕОНЕ И ЕГО СМЕСЯХ С ГЕЛИЕМ И АРГОНОМ

Чл.-кор. НАН Украины А. Я. ИЩЕНКО, И. В. ДОВБИЩЕНКО, В. С. МАШИН, кандидаты техн. наук,  
М. П. ПАШУЛЯ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализированы вольт-амперные характеристики стационарной и импульсной дуги в смесях различных инертных газов, особенности формирования и геометрические параметры швов. Показана принципиальная возможность и экономическая целесообразность применения гелий-неоновых смесей для защиты зоны сварки.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, алюминиевые сплавы, плавящийся электрод, инертные газы, смеси газов, вольт-амперные характеристики, параметры шва, дефекты

Для изготовления и ремонта крупногабаритных конструкций из алюминиевых сплавов широко используется дуговая сварка плавящимся электродом в инертных газах. В отличие от сварки неплавящимся вольфрамовым электродом этот способ обеспечивает более высокую производительность процесса, уменьшение зоны термического влияния и снижение уровня остаточных деформаций изделий (особенно из тонколистового материала) [1]. При сварке плавящимся электродом алюминиевых сплавов в качестве защитных газов применяют аргон, гелий и их смеси [1–6]. Недостатком сварки в аргоне является значительная выпуклость шва, специфическая форма проплавления с резким сужением в корне шва, существенные потери некоторых легирующих элементов из электродного металла, повышенная пористость швов. Вследствие этого механические и коррозионные свойства соединений относительно низкие. Применение одного гелия ограничивается его высокой стоимостью, большим расходом при сварке толстолистового металла, нестабильностью горения дуги и повышенным разбрызгиванием металла. Поэтому в качестве защитных газов рекомендуется применять гелий-argonовые смеси. Содержание гелия в таких смесях составляет от 50 до 75 %. Количество аргона и гелия в смеси зависит от химического состава свариваемого сплава, его толщины и требований, предъявляемых к качеству металла шва [4, 5]. Себестоимость процесса сварки в гелий-argonовых смесях остается более высокой по сравнению со сваркой в одном аргоне. В технологической линии производства кислорода, азота и аргона на определенной стадии разделения воздуха образуется смесь гелия и неона (3...25 % Ne). Возможность эффективного использования этой сравнительно дешевой (по сравнению с чистым гелием) смеси при дуговой сварке алюминиевых сплавов неплавящимся электродом показана в работе [7].

В связи с этим представляется важным определение влияния неона и его смесей с аргоном и гелием на качество швов при сварке алюминиевых

© А. Я. Ищенко, И. В. Довбищенко, В. С. Машин, М. П. Пашуля, 2002

сплавов плавящимся электродом стационарной и импульсной дугой, установление влияния различных составов защитных газов на вольт-амперные характеристики (ВАХ) дуги, стабильность ее горения, качество формирования и геометрические параметры швов.

Для исследования использовали алюминиевый сплав АМг5 (ГОСТ 4784–74) толщиной 18 мм и сварочные проволоки СвАМг5 (ГОСТ 7871–75) диаметром 1,6 и 2,0 мм. В качестве защитных газов применяли аргон высшего сорта (ГОСТ 10157–79), гелий марки А (ТУ 51-940-80), неон (ТУ-У-14299304-001-96), готовую гелий-неоновую смесь (85 % He + 15 % Ne) и приготовленные на их основе двойные и тройные смеси. Физические характеристики инертных газов по данным работы [8] приведены в табл. 1, их химический состав — в табл. 2. По своим характеристикам неон занимает промежуточное положение между гелием и аргоном. Значение его потенциала ионизации находится ближе к гелию, а коэффициент теплопроводности (удельная теплопроводность) приближается к аргону. Такие свойства неона (по сравнению с аргоном) в первую очередь приводят к заметному повышению напряжения на дуге (из-за относительно высокого потенциала ионизации по сравнению с аргоном) и увеличению ширины проплавления (из-за более высокого коэффициента теплопроводности по сравнению с аргоном). При сварке в неоне (как и при сварке в гелии), по-видимому, происходит перераспределение падения напряжения на аноде и катоде, сжимается столб дуги и повышается плотность энергии.

Смеси инертных газов готовили путем непрерывного смешивания при дозированном расходе

Таблица 1. Физические характеристики инертных газов

Параметр	Гелий	Неон	Аргон
Атомная масса	4,003	20,183	39,944
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	0,1785	0,8990	1,7840
Потенциал ионизации, эВ	24,58	21,56	15,76
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,1430	0,0468	0,0167
Удельная теплопроводность, Дж/(кг·°C)	5190	1030	520

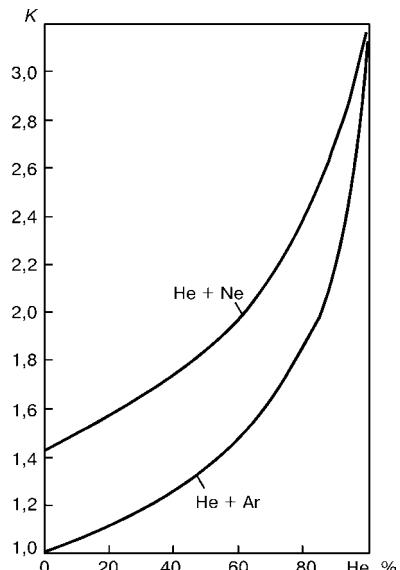


Рис. 1. Поправочные коэффициенты  $K$  для определения действительного расхода гелий-неоновой и гелий-argonовой смесей с помощью ротаметров, градуированных по аргону

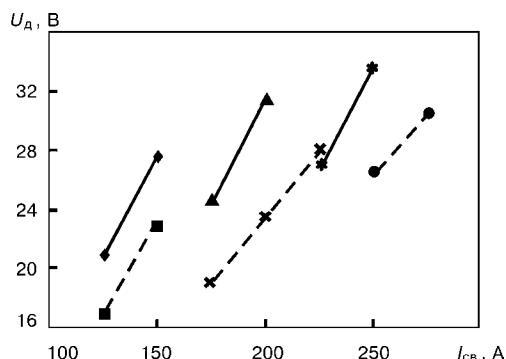


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики дуги, горящей в неоне (сплошная кривая) и аргоне (штриховая), при ИДСПЭ в зависимости от скорости подачи проволоки: ■, ◆ – 300; ▲, ✕ – 400; \* – 500 м/ч

каждого компонента. Расход определяли по показаниям ротаметров, градуированных по аргону. Для их использования под неон, гелий и смеси сделан пересчет градуировочных шкал. Действительный расход газов вычисляли по следующим формулам:

$$Q_{\text{газа}} = Q_{\text{Ar}}K, K = \sqrt{\frac{\gamma_{\text{Ar}}}{\gamma_{\text{газа}}}},$$

$$\gamma_{\text{газа}} = (\gamma_{\text{Ar}}P_{\text{Ar}} + \gamma_{\text{Ne}}P_{\text{Ne}} + \gamma_{\text{He}}P_{\text{He}})/100,$$

где  $Q$  – расход газа, л/мин;  $K$  – коэффициент поправки (для всех ротаметров типа РС и РМ);  $\gamma$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $P$  – содержание газа в смеси, %. Поправочные коэффициенты  $K$

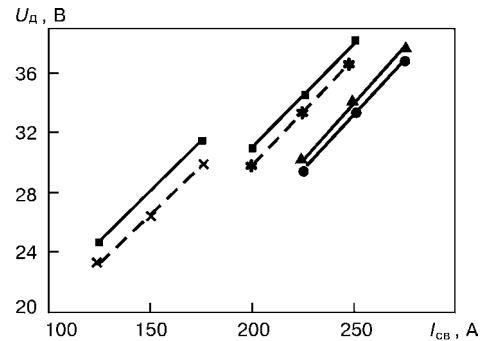


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики дуги, горящей в гелии (сплошная кривая) и гелий-неоновой смеси, содержащей 15 % Ne (штриховая), при ИДСПЭ в зависимости от скорости подачи проволоки: ■, ✕ – 300; ▲, ● – 400; ▲, ● – 500 м/ч

для определения действительного расхода гелий-неоновой и гелий-argonовой смесей представлены на рис. 1.

Очистку поверхности основного металла выполняли путем химического травления по общепринятой методике [2]. Перед сваркой поверхность металла в зоне сварки зачищали шабером (0,05 мм). Для однопроходной сварки (наплавки) плавящимся электродом стационарной (СПЭ) и импульсной дугой (ИДСПЭ) использовали источники питания ВДУ-506, «Fronius TPS-450» и горелки «Fronius Pull MIG PM-502Z». Корень шва формировали на съемной подкладке из нержавеющей стали с канавкой. Параметры режимов СПЭ в аргоне, неоне, гелии и их смесях следующие:  $d_{\text{пр}} = 2,0$  мм,  $I_{\text{св,ср}} = 220...380$  А,  $U_{\text{д,ср}} = 24...36$  В,  $v_{\text{п,пр}} = 260...480$  м/ч,  $v_{\text{св}} = 15...40$  м/ч,  $l_{\text{д}} = 3...5$  мм;  $Q_{\text{газа}} = 30...60$  л/мин. Параметры режимов ИДСПЭ:  $d_{\text{пр}} = 1,6$  мм,  $I_{\text{св,ср}} = 120...320$  А,  $U_{\text{д,ср}} = 18...38$  В,  $v_{\text{п,пр}} = 280...530$  м/ч,  $v_{\text{св}} = 20$  м/ч,  $l_{\text{д}} = 2...18$  мм,  $I_{\text{имп}} = 460...540$  А,  $f_{\text{имп}} = 90...210$  Гц,  $t_{\text{имп}} = 3,1...3,8$  мс,  $Q_{\text{газа}} = 40$  л/мин.

Геометрические параметры швов (глубина проплавления основного металла  $h$ , ширина шва с лицевой стороны  $B$ , высота его выпуклости  $l$ ) определяли с помощью микроскопа ММИ-2 на поперечных макрошлифах с точностью  $\pm 0,1$  мм.

Анализ ВАХ импульсной дуги, горящей в аргоне, неоне, гелии и гелий-неоновой смеси (15 % неона), при различных скоростях подачи электродной проволоки ( $l_{\text{д}} = 2...18$  мм) показал, что при одном и том же сварочном токе напряжение на дуге, горящей в неоне, на 4...8 В выше, чем в аргоне (рис. 2). При тех же скоростях подачи проволоки напряжение на дуге в гелий-неоновой смеси на 0,5...1,5 В ниже, чем в одном гелии (рис. 3). Чем выше среднее значение сварочного тока, тем меньше разница в значениях между ВАХ

дуги, горящей в гелии и гелий-неоновой смеси. Введение неона в аргон вплоть до 100 % (при  $v_{\text{п,пр}} = \text{const}$ ) приводит к укорачиванию длины дуги, повышению разбрзывания электродного металла и снижению на 20...30 А среднего сварочного тока (рис. 4, а). Для восстановления стабильности

Таблица 2. Химический состав газообразных инертных газов

Газ	Содержание (≤) примесей, об. % × 10 <sup>4</sup>							
	Ar	Ne	He	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> + CH <sub>4</sub>
Аргон	Основа	–	–	50	7	1	10	5
Неон	–	Основа	35	3	1	1	2	1
Гелий	1	40	Основа	5	1	1	5	3
Гелий (основа) + 15 % неона	40	Основа	Основа	10	2	1	6	4

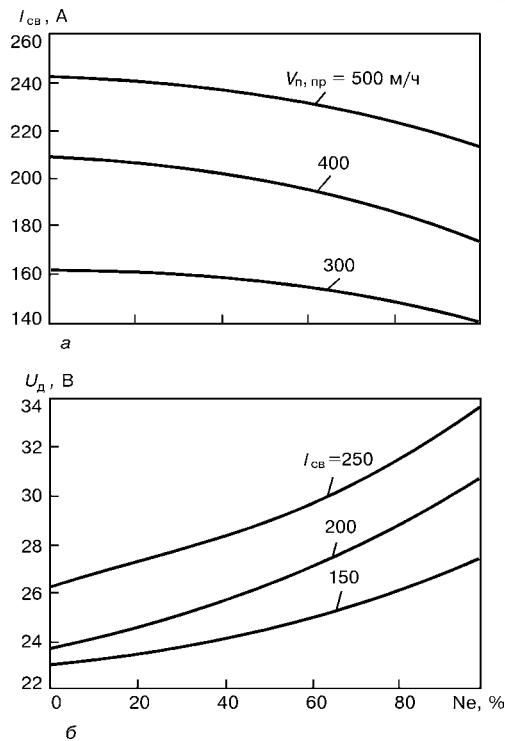


Рис. 4. Влияние неона в аргон-неоновой смеси на сварочный ток при  $U_d \approx 25$  В (а) и напряжение на дуге (б) при ИДСПЭ: а — при постоянной подаче сварочной проволоки; б — при постоянном сварочном токе

процесса сварки и тока необходимо повысить напряжение на дуге на 2...8 В в зависимости от содержания неона в смеси и величины тока (рис. 4, б). При этом глубина проплавления металла и ширина шва возрастают соответственно на 0,7...1,1 и

1,9...2,3 мм. В наибольшей степени влияние неона на электрические параметры дуги и геометрическую форму швов проявляется при его содержании в смеси свыше 40 %.

Зависимость состава защитного газа и скорости сварки на геометрические параметры швов, полученных при СПЭ, показана на рис. 5, 6. Как и при ИДСПЭ, замена аргона на неон ( $He = 0\%$ ) приводит к увеличению глубины проплавления, ширины шва и снижению его выпуклости. Введение гелия в неон (при постоянных значениях  $I_{cb}$  и  $I_d$ ) способствует дальнейшему росту глубины и ширины шва, особенно с повышением содержания гелия от 30 до 65 % (рис. 5). При этом устойчивость горения дуги, стабильность формирования шва и ширина катодной очистки соответствуют показателям, полученным в гелий-argonовых смесях (при тех же содержаниях гелия).

Таким образом, при любых соотношениях неона и гелия независимо от способа и режимов сварки ширина и глубина проплавления основного металла большие, чем при тех же соотношениях аргона и гелия. Геометрические параметры швов, выполненных в гелии и гелий-неоновых смесях ( $He \geq 85\%$ ;  $I_{cb} = 250\ldots 350$  А;  $v_{cb} = 15\ldots 20$  м/ч), имеют практически одни и те же значения (рис. 6). В случае применения смеси газов с содержанием более 92...95 % гелия примеси неона не влияют на размеры швов.

Исследования поперечных макрошлифов показали, что пористость в наплавленном металле, полученном в неоне и гелий-неоновых смесях, в 1,1...1,6 раза меньше, чем в аргоне и гелий-ар-

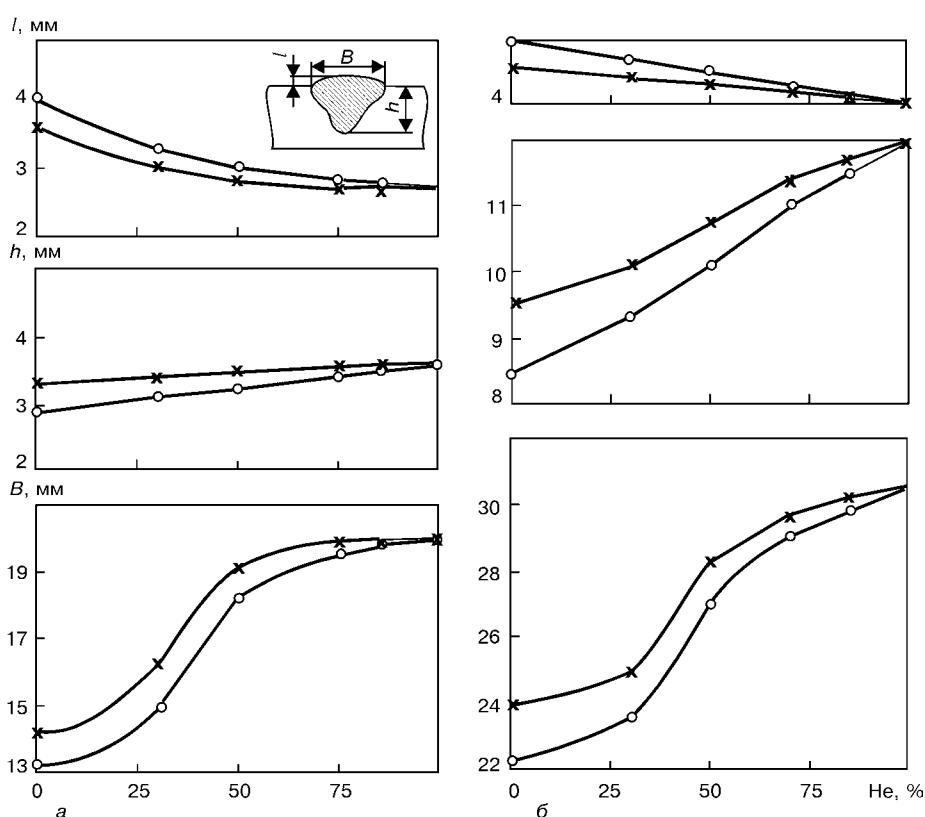


Рис. 5. Влияние состава гелий-аргоновой (○) и гелий-неоновой (Х) смеси на геометрические параметры швов, полученных СПЭ ( $d_{np} = 2,0$  мм,  $l_d \approx 4 \pm 1$  мм,  $v_{cb} = 20$  м/ч): а —  $I_{cb} = 250$ , б — 350

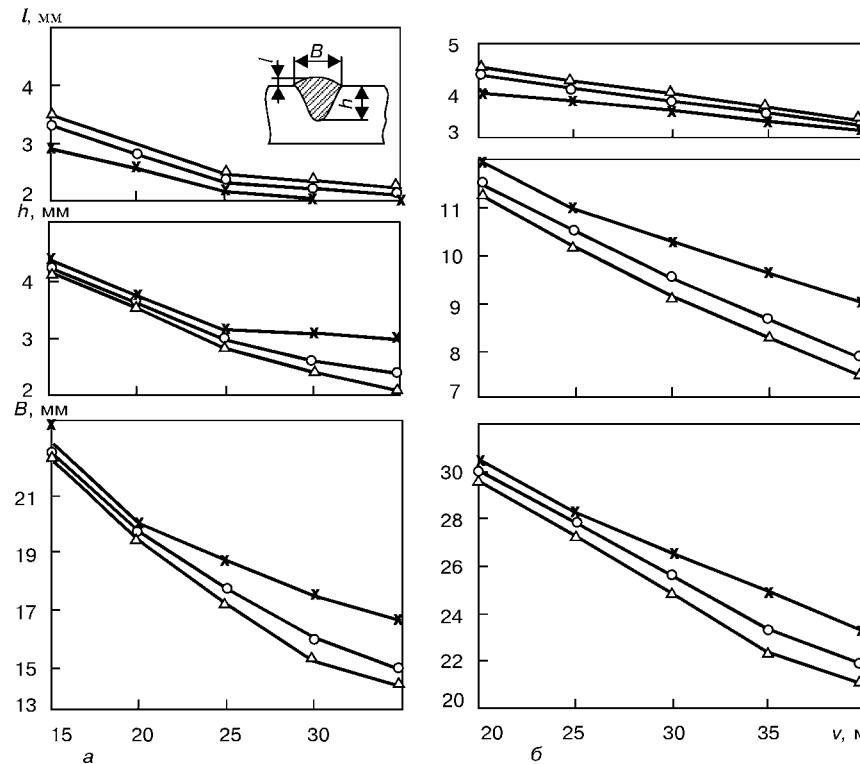


Рис. 6. Влияние скорости сварки и состава защитного газа ( $\times$  — гелий;  $\circ$  — гелий (основа) + 15% неона;  $\Delta$  — гелий (основа) + 15% аргона) на геометрические параметры швов при СПЭ ( $U_d = 36 \pm 1$  В,  $d_{up} = 2,0$  мм):  $a$  —  $I_{cb} = 250$  А,  $v_{up} = 275$  м/ч;  $b$  —  $I_{cb} = 350$  А,  $v_{up} = 470$  м/ч

гоновых смесях. Это связано с теплофизическими свойствами неона и меньшим по сравнению с аргоном содержанием в нем «вредных» примесей (водород, влага, углеводороды и др.).

В связи с увеличением объема (массы) сварочной ванны при сварке в неоне (см. рис. 5) можно предположить, что неон, как и гелий [9, 10], снижает среднюю температуру капель электродного металла и повышает среднюю температуру сварочной ванны. Это создает более благоприятные условия для снижения растворимости водорода в электродных каплях и повышения скорости его выделения из сварочной ванны в виде газовых пузырьков [6].

Технико-экономические расчеты показывают, что применение в качестве защитного газа одного неона нецелесообразно из-за его дефицита и высокой стоимости (неон дороже гелия). В то же время стоимость 1 м<sup>3</sup> готовых гелий-неоновых смесей ( $Ne = 3\ldots 25\%$ ) практически не зависит от количества неона и в среднем на 25 % ниже стоимости одного гелия. Использование тройных смесей инертных газов, приготовленных на поставляемых в баллонах гелий-неоновых смесях и аргоне (50...70 % He + 3...23 % Ne + 7...47 % Ar), позволяет дополнительно уменьшить затраты на защитный газ и соответственно снизить себестоимость сварочных работ.

Следует отметить, что замена гелий-argonовых смесей на готовые гелий-неоновые смеси при сварке алюминиевых сплавов приводит к повышению напряжения на дуге, росту глубины проплавления ме-

талла, увеличению ширины шва, уменьшению его выпуклости и снижению пористости в наплавленном металле.

1. Повышение прочности швов при дуговой сварке сплава 1420 с применением скандийсодержащих присадок / А. Я. Ищенко, А. В. Лозовская, А. Г. Покляцкий и др. // Автомат. сварка. — 2002. — № 1. — С. 11–16.
2. Рабкин Д. М., Игнатьев В. Г., Добищенко И. В. Дуговая сварка алюминия и его сплавов. — М.: Машиностроение, 1982. — 95 с.
3. Влияние режимов импульсно-дуговой сварки алюминия АД0 на форму и пористость швов / В. С. Машин, В. М. Павшук, И. В. Довбищенко и др. // Автомат. сварка. — 1991. — № 4. — С. 57–60.
4. Машин В. С., Довбищенко И. В., Цыплюхин А. В. Номограмма режимов сварки алюминиевых сплавов плавящимся электродом в гелий-аргоновых смесях // Там же. — 1991. — № 10. — С. 55–56.
5. Довбищенко И. В., Ищенко А. Я., Машин В. С. Особенности сварки алюминиевых сплавов плавящимся электродом в гелий-аргоновых смесях // Там же. — 1993. — № 6. — С. 38–43.
6. Довбищенко И. В., Ищенко А. Я., Машин В. С. Применение гелия при сварке алюминиевых сплавов плавящимся электродом // Там же. — 1997. — № 2. — С. 14–19.
7. Влияние состава защитных газов на технологические характеристики дуги при сварке алюминиевых сплавов плавящимся электродом / А. Я. Ищенко, В. П. Будник, А. Г. Покляцкий и др. // Там же. — 2000. — № 2. — С. 19–22.
8. Финкельштейн Д. Н. Инертные газы. — М.: Наука, 1979. — 200 с.
9. Средняя температура металла электродных капель при сварке алюминиевых сплавов в инертных газах / А. Я. Ищенко, В. С. Машин, И. В. Довбищенко и др. // Там же. — 1994. — № 1. — С. 48–49.
10. Средняя температура металла ванны при дуговой сварке алюминиевых сплавов в инертных газах / А. Я. Ищенко, В. С. Машин, И. В. Довбищенко и др. // Там же. — 1994. — № 11. — С. 15–19.

Volt-ampere characteristics of stationary and pulsating arcs burning in different mixtures of inert gases, peculiarities of formation and geometric parameters of the welds are analysed. The feasibility and cost effectiveness of using helium-neon mixtures for shielding the welding zone are proved

Поступила в редакцию 11.03.2002

# ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДНЫХ ПЛЕН В ШВАХ ПРИ СВАРКЕ ЛИТИЙСОДЕРЖАЩИХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

**А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, инж., А. В. ЛОЗОВСКАЯ, канд. техн. наук, А. А. ГРИНЮК, инж.**  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрено влияние различных технологических факторов на образование протяженных нитевидных включений оксидной плены в швах при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом литийсодержащих алюминиевых сплавов. Предполагается, что основными причинами образования этих дефектов является более высокая температура плавления присадочного материала, чем основного. Предложены рекомендации, позволяющие получать качественные сварные соединения литийсодержащих алюминиевых сплавов.

**Ключевые слова:** аргонодуговая сварка, литийсодержащие алюминиевые сплавы, неплавящийся электрод, оксидная пленка, присадочная проволока, подогрев, асимметричный ток, вторичные фазы

Перспективные литийсодержащие алюминиевые сплавы отличаются низким удельным весом и высокими прочностными характеристиками [1]. Благодаря такому сочетанию свойств они находят широкое применение в авиационной и космической технике [2–4]. Конструктивные решения отдельных элементов, узлов и самих корпусов летательных аппаратов предусматривают использование различных способов сварки, из которых наиболее распространена аргонодуговая сварка неплавящимся электродом. Однако недостатком этого способа сварки является опасность образования дефектов в металле шва [4–6] (пор и оксидных плен), ухудшающих механические свойства сварных соединений и нарушающих их герметичность.

Известно, что на поверхности алюминия постоянно присутствует оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в виде плены, его температура плавления составляет  $2300\dots 2320^\circ\text{C}$ . Во влажной среде обычно образуется гидроксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , имеющий переменный состав и структуру. Толщина оксидной плены изменяется в широких пределах (от 2...3 до 20...40 нм) и увеличивается вместе с температурой нагрева. На горячекатаном металле она может достигать толщины 200 нм и более. Оксидная пленка обладает значительной адсорбционной способностью по отношению к газам и различного рода неметаллическим включениям. Наличие в алюминиевых сплавах добавок щелочных и щелочноземельных металлов способствует насыщению плены оксидами этих металлов [7, 8].

В настоящее время разработан ряд технологических рекомендаций, обеспечивающих повышение качества металла шва при сварке алюминиевых сплавов. Они сводятся к удалению оксидных плен с поверхности сварочных материалов и усовершенствованию режимов и технологии сварки.

Для дегазации сварочной ванны и получения бездефектных сварных соединений, помимо по-

вышения требований к предварительной подготовке свариваемых кромок и улучшению защиты металла от окисления, рекомендуется также сварка пульсирующей дугой [9–11].

Однако выполнение указанных рекомендаций при сварке литийсодержащих алюминиевых сплавов еще не гарантирует получение швов с качественным формированием. Предполагается, что повышенная склонность металла шва к образованию оксидных плен обусловлена природой указанных сплавов. Закаты, микрорасслоения, строчечные скопления фазовых составляющих попадают в зону проплавления вместе с пленой, находящейся на поверхности свариваемого металла, которая не обрабатывается дугой. Однако при выполнении соединений литийсодержащих алюминиевых сплавов дуговой сваркой без использования присадочной проволоки плены в металле шва не образуются.

Механизм формирования протяженных включений оксидной плены, располагающихся, как правило, в центральной части швов, и причины их возникновения пока до конца не изучены и требуют дальнейших исследований.

**Материалы и методика исследований.** С целью изучения влияния различных технологических мероприятий на процессы образования протяженных включений оксидной плены в металле швов сваривали стыковые соединения литийсодержащих алюминиевых сплавов 1420 и 1460 толщиной 3, 4 и 6 мм. В качестве присадочных материалов использовали сварочные проволоки из чистого алюминия и систем легирования Al–Mg, Al–Cu, Al–Si, Al–Cu–Mg, Al–Cu–Si, имеющие различные диаметры (1,2; 1,6; 2,0 и 2,5 мм), а также пластины листовых материалов (сплавы 1420; 1460; 1201; AMg6). Перед сваркой поверхность образцов протравливали по общепринятой технологии, а свариваемые кромки защищали механическим путем на глубину не менее 0,1 мм.

С помощью источников питания дуги ИСВУ-315, И-126 (производства Украины) и MW-450 (Австрия) осуществляли стационарный и пульсирующий режимы сварки.

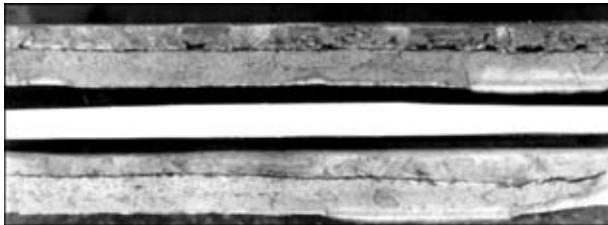


Рис. 1. Протяженные нитевидные включения оксидной плены в изломах швов, образующиеся при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом пластин сплава 1460

Швы формировали на подкладке с различными размерами канавок. Для обеспечения дополнительной защиты корневой части швов использовали специальные подкладки с отверстиями для подачи аргона. Кроме того, для защиты верхней и нижней поверхностей некоторыхстыков применяли фольгу из алюминия.

С помощью трансформатора ТДМ-315 и балластного реостата РБ-300 для подогрева присадочной проволоки на ее участке длиной 25 мм пропускали переменный синусоидальный ток промышленной частоты. Трансформатором тока УТТ-5 измеряли проходящий через присадку ток. При этом учитывали известную формулу

$$c m \Delta T = I^2 R t, \quad (1)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость материала проводника;  $m$  — его масса;  $\Delta T$  — изменение его температуры;  $I$  и  $R$  — соответственно ток и сопротивление в проводнике;  $t$  — время прохождения в нем тока.

Температуру подогрева присадочной проволоки определяли из выражения

$$\Delta T_{\text{п}} = 16 \frac{I_{\text{п}}^2 \rho_{\text{п}} l_{\text{п}}}{\pi^2 d_{\text{п}}^4 v_{\text{п}} c_j}, \quad (2)$$

где  $I_{\text{п}}$  — проходящий через присадочную проволоку ток;  $\rho_{\text{п}}$  — удельное сопротивление материала присадочной проволоки;  $l_{\text{п}}$  — длина участка присадочной проволоки, через который проходит ток;  $v_{\text{п}}$  — скорость подачи присадочной проволоки;  $j$  — удельный вес материала присадки.

После сварки механическим способом удаляли усиления и корни швов и делали продольные изломы. На основании исследований изломов оценивали качество швов, полученных с использованием различных технологических приемов.

**Результаты исследований.** При обычной аргонодуговой сварке стационарной дугой неплавящимся электродом без применения присадочной проволоки литийсодержащих алюминиевых сплавов 1420 и 1460 как в одноименном, так и в разноименном сочетаниях материалов возникновения протяженных включений оксидной плены в швах не наблюдалось. В случае подачи присадочной проволоки в сварочную ванну в центральной части швов появляются протяженные дефекты, причем независимо от системы легирования, диаметра и способа предварительной подготовки поверхности проволоки (рис. 1). Даже при механической зачистке ее поверхности непосредственно

перед сваркой не возможно избежать образования нитевидных включений, хотя и более тонких.

Комплекс мероприятий, направленных на обеспечение надежной защиты металла от окисления при аргонодуговой сварке, получение качественных сварных соединений не обеспечил. Поддув аргона через отверстия в специальной подкладке образованию протяженных дефектов не препятствовал. Защита стыка от окружающей атмосферы полоской алюминиевой фольги с его лицевой стороны или с обеих сторон привела к появлению наряду с протяженной продольной пленой мелких дезориентированных дефектов.

Попытки повлиять на характер расположения оксидных включений в металле швов с помощью изменения формы и размеров формирующей канавки, угла наклона горелки или формы разделки кромок оказались безрезультатными. Появление нитевидных протяженных включений оксидной плены по-прежнему происходит в центральной части шва.

Применение источников питания дуги И-126, ИСВУ-315, MW-450 с различными динамическими характеристиками и формой волны сварочного тока существенного влияния на образование рассматриваемого типа оксидных включений в металле швов при сварке литийсодержащих алюминиевых сплавов не оказали. Изменение частоты смены полярностей тока ( $f = 50 \dots 250$  Гц) или использование сварочного тока с низкочастотной пульсацией при модуляции ( $f_m = 2 \dots 5$  Гц) также не дали ощутимых результатов. Интенсивные колебания расплавленного металла сварочной ванны приводят к периодическому изменению скорости его кристаллизации, но не нарушают непрерывности процесса. Поэтому оксидные включения в металле швов по-прежнему образуются по всей длине стыка, как и при сварке стационарной дугой.

Вероятность образования нитевидных включений в металле швов уменьшается в случае активизации процессов разрушения оксидной плены при сварке, что достигается использованием асимметричного тока с преобладанием длительности импульсов при обратной полярности. Результаты исследования продольных изломов швов показали, что для получения швов с качественным формированием при сварке присадочными проволоками различных систем легирования необходимо изменять соотношение длительностей импульсов при прямой и обратной полярностях. В случае сварки с присадочной проволокой системы Al—Si бездефектные швы формируются при использовании асимметричного тока с коэффициентом временной асимметрии  $K_{\text{ac}}^t = 0,35 \dots 0,40$ . Применяя присадочную проволоку систем легирования Al—Mg и Al—Cu—Mg, во избежание образования дефектов необходимо уменьшить значения  $K_{\text{ac}}^t$  до  $0,25 \dots 0,30$ . Но при сварке с присадочными проволоками систем Al—Cu—Si и Al—Si оксидные включения в металле швов возникают даже при  $K_{\text{ac}}^t \leq 0,2$ .

На рис. 2 показаны поверхности изломов швов с включениями оксидной плены в сварных соединениях, полученных при аргонодуговой сварке

пластин сплава 1460 толщиной 3 мм с использованием присадочных проволок различных систем легирования. Включения оксидной плены независимо от типа присадочной проволоки имели различную форму и цвет, развитую поверхность с углублениями и выступами. Изменение цвета плены от блестящего до черного, по-видимому, обусловлено ее различной толщиной. Под тонкой прозрачной пленой просматривается дендритная структура литого металла (рис. 2, а, б). Плены черного цвета плотные и характеризуются наличием большого количества трещин (рис. 2, в, г).

Установлено, что на поверхности оксидных плен скапливаются включения интерметаллидных фаз, содержащих железо, кремний, скандий, а также в большом количестве калий и кальций. Результаты сканирующего микрорентгеноспектрального анализа поверхности излома швов по месту расположения оксидной плены и поверхности долома показали, что содержание легирующих и примесных элементов зависит от химического состава металла шва. При сопоставлении спектров, отражающих количественное содержание элементов в участках с пленой и без нее, существенного отличия выявлено не было. Таким образом, применение присадочных проволок различных систем легирования не исключает появление оксидных плен в металле швов, однако приводит к изменению его состава.

Результаты исследований показали, что образование протяженных нитеобразных включений оксидной плены в центральной части швов при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом с использованием присадочной проволоки является характерной особенностью литийсодержащих алюминиевых сплавов. И если хотя бы одна из свариваемых встык пластин алюминиевого сплава содержит литий, то образование дефектов практически неизбежно. Анализ изломов макро- и микроструктуры металла швов однозначно свидетельствует, что оксидные плены располагаются в центре шва на расстоянии примерно 1/3 от его корня.

Не обнаруживаются протяженные дефекты в изломах швов, выполненных аргонодуговой сваркой на повышенных токах или в гелии. Увеличение температуры нагрева присадочной проволоки способствует активизации процессов катодного и термического разрушения оксидной плены. По этой же причине вероятность образования протяженных оксидных включений в металле швов уменьшается при использовании асимметричного тока с преобладанием длительности импульсов при обратной полярности.

Однако аргонодуговая сварка термически упрочняемых сплавов, содержащих литий, на повышенных режимах неприемлема, так как вызывает перегрев

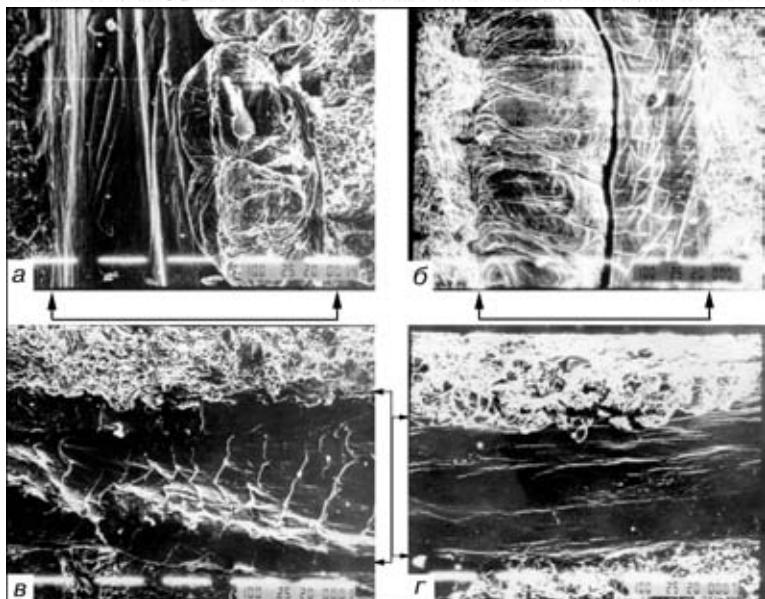


Рис. 2. Микроструктуры ( $\times 100$ ) оксидных плен в изломах швов, полученных при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом пластин сплава 1460 с использованием различных типов присадочных проволок (стрелками показаны участки оксидной плены): а — СвАК5; б — СвАМг63; в — 1201Sc; г — Св-1201

металла шва и зоны термического влияния.

Можно предположить, что поскольку присадочные проволоки типа Св-1201 и СвАМгб имеют температуру плавления выше, чем свариваемый металл, то на режимах, обеспечивающих его плавление, полного катодного разрушения оксидной плены на поверхности присадочной проволоки не происходит и ее неразрушенные фрагменты попадают в расплав. Под действием силы тяжести они опускаются в донную часть сварочной ванны, но силы поверхностного натяжения препятствуют их полному погружению. Поэтому в большинстве случаев оксидные включения обнаруживаются в центральной части сварочной ванны.

Результаты сравнительных исследований температурного интервала плавления и кристаллизации сварочных материалов в неравновесных условиях, приближающихся к условиям сварки, позволили установить, что самый большой интервал плавления и самый низкий солидус имеет основной металл. Температура солидуса у сплава 1460 не превышает  $500^{\circ}\text{C}$  и колеблется в интервале  $460\ldots 490^{\circ}\text{C}$ . Температура солидуса присадочных сварочных проволок на  $50\ldots 70^{\circ}\text{C}$ , а ликвидуса на  $20\ldots 30^{\circ}\text{C}$  выше, чем у основного металла.

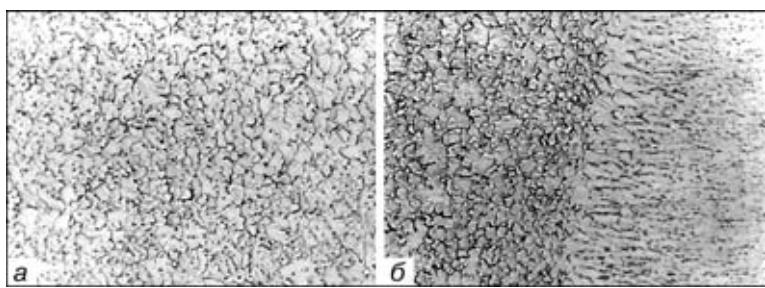


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 200$ ) металла шва (а) и зоны сплавления (б) сваренного соединения, полученного при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом пластин сплава 1460 с подогревом присадочной проволоки

Подтверждением такого механизма появления дефектов является тот факт, что при выполнении сварных соединений без присадочной проволоки они не образуются. Кроме того, если вместо непрерывно поступающей в сварочную ванну присадочной проволоки между кромками или на кромки положить полоску металла, с аналогичным ей химическим составом, то на продольных изломах швов появление дефектов не наблюдается. По-видимому, при подогреве присадочного материала исчезает перепад температур на границе контакта расплавов присадочной проволоки и основного металла. В результате остающиеся в металле швов выделения не концентрируются в определенном месте, а рассредоточиваются по всему его объему. И даже если мелкие частицы плены со свариваемых кромок основного металла или вставленной полоски присадочного материала не разрушаются и попадают в сварочную ванну, то они не могут инициировать скопление вокруг себя выделений разрозненных фаз. Поэтому протяженные включения оксидной плены не образуются.

При разработке способа предотвращения появления оксидных плен в металле шва при сварке литийсодержащих алюминиевых сплавов следует учитывать, что образование оксидной плены на поверхности свариваемых материалов происходит мгновенно приблизительно за  $1 \cdot 10^{-7}$  с [12]. Оксидная пленка обладает адсорбционной способностью по отношению к газам и влаге. Формула и структура плены изменяются в зависимости от температуры нагрева, и на границе контакта «холодной» присадочной проволоки со сварочной ванной происходит локальное охлаждение расплава.

Таким образом, подогрев присадочной проволоки способствует уменьшению  $nH_2O$  адсорбированной оксидной плены и повышению или выравниванию температуры в зоне контакта присадочной проволоки с расплавом сварочной ванны. Проведенные эксперименты подтвердили целесообразность такой операции.

При аргонодуговой сварке неплавящимся электродом литийсодержащих алюминиевых сплавов 1420 и 1460 присадочную проволоку подогревали до 50...200 °C переменным током. Результаты исследования изломов швов, выполненных присадочной проволокой, подогретой на 150 °C, показали, что независимо от системы ее легирования образование протяженных дефектов в металле швов не происходит.

Металлографические исследования макро- и микроструктуры сварных соединений при сварке сплава 1460 с подогревом присадочной проволоки свидетельствовали о том, что полученный металл

шва отличается высоким качеством: металл шва имеет мелкокристаллическую структуру без оксидных плен и других видов дефектов (рис. 3).

В результате проведенных исследований установлено, что образование протяженных нитевидных включений оксидной плены в швах при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом литийсодержащих алюминиевых сплавов с использованием присадочных проволок типа Св-1201, СвАМгб обусловлено локальным охлаждением в зоне контакта присадочной проволоки с расплавом ванны.

Во избежание образования этих дефектов необходимо обеспечить благоприятные условия для активизации процессов разрушения оксидной плены на поверхности поступающей присадочной проволоки и свариваемых кромках. Поэтому сварку литийсодержащих алюминиевых сплавов рекомендуется выполнять асимметричным током с преобладанием длительности импульсов тока при обратной полярности и подогревом присадочной проволоки перед ее подачей в сварочную ванну.

1. Алюминий-литиевые сплавы. Структура и свойства / И. Н. Фридляnder, К. В. Чуистов, А. Л. Березина, Н. Н. Колобнев. — Киев: Наук. думка, 1992. — 192 с.
2. Братухин А. Г., Редчиц В. И., Лукин В. И. Перспективы использования алюминиево-литиевых сплавов для штампо-сварных конструкций летательных аппаратов // Свароч. пр-во. — 1996. — № 7. — С. 18–21.
3. Chien P. Welding the space shuttle's Al-Li external tank presents a challenge // Welding J. — 1998. — № 6. — P. 45–48.
4. Овчинников В. В., Дриц А. М., Крылова Т. В. Технологические особенности производства сварных конструкций летательных аппаратов из алюминиево-литиевого сплава 1460 // Свароч. пр-во. — 1997. — № 12. — С. 26–29.
5. Рязанцев В. И., Федосеев В. А., Манцов В. Н. Создание сварного кузова автомобиля из алюминиевых сплавов // Там же. — 1999. — № 11. — С. 36–42.
6. Покляцкий А. Г. Особенности образования макровключений оксидной плены в металле швов алюминиевых сплавов (Обзор) // Автомат. сварка. — 2001. — № 3. — С. 38–40.
7. Варакина П. П., Мироненко В. В., Полянский В. М. Влияние вылеживания сплава 01420 при комнатной температуре на изменение фазового состава поверхностного слоя // Технология легких сплавов. — 1979. — № 6. — С. 10–11.
8. Ширяева Н. В., Овчинников В. В., Габидуллин Р. М. Образование пор при сварке сплава системы алюминий–магний–литий // Автомат. сварка. — 1987. — № 3. — С. 16–18.
9. 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 // Там же. — 1982. — № 6. — С. 53–54.
10. Чапон А. Г. Сварка алюминиевого сплава 01420 с запайкой обратной стороны шва гибкой металлической подкладкой // Там же. — 1980. — № 8. — С. 72–73.
11. Илющенко Р. В. Влияние параметров режима сварки пульсирующей дугой в аргоне на пористость соединений сплава 1420 // Там же. — 1990. — № 9. — С. 27–30.
12. Рабкин Д. М. Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов. — Киев: Наук. думка, 1986. — 256 с.

The effect exerted by different technological factors on formation of extended filamentary inclusions of an oxide film in the TIG welds on aluminium-lithium alloys is considered. The main cause of formation of these defects is supposed to be a higher melting temperature of the filler metal, compared with the base metal. Recommendations are offered, allowing the quality welded joints to be produced on aluminium-lithium alloys

Поступила в редакцию 04.07.2001,  
в окончательном варианте 27.10.2002

# ПОКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОДЫ МАРКИ УАНА ДЛЯ СВАРКИ И НАПЛАВКИ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ

**Н. В. СКОРИНА, В. С. МАШИН**, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены характеристики и некоторые особенности технологии изготовления покрытых электродов для ручной дуговой сварки алюминия и алюминиевых сплавов, разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона. Показана необходимость завершения химических реакций, протекающих при приготовлении обмазочной массы для стабилизации ее экструзии при опрессовке. Установлена оптимальная температура прокалки электродов, обеспечивающая низкую склонность покрытий к поглощению атмосферной влаги.

**Ключевые слова:** покрытые алюминиевые электроды, обмазочная масса, режимы термообработки, алюминиевые сплавы, режимы сварки, механические свойства

В последнее время все чаще возникает потребность в восстановлении и ремонте деталей, узлов и конструкций сельскохозяйственных машин, автомобилей, трубопроводов и емкостей различного назначения из литьевых и деформируемых алюминиевых сплавов. Распространенный способ аргонодуговой сварки (наплавки) вольфрамовым и плавящимся электродом требует тщательной подготовки свариваемых кромок и электродной проволоки, дорогостоящих вольфрамовых электродов, инертных газов, сложного сварочного оборудования и высокой квалификации операторов-сварщиков.

Наиболее простым и дешевым способом сварки и ремонта алюминиевых изделий является сварка покрытыми электродами, которую можно легко применять в полевых условиях и в небольших ремонтных мастерских.

Анализ литературных данных показал, что в ведущих промышленно развитых странах все более расширяется применение электродов для ручной дуговой сварки и наплавки алюминия и его сплавов. Практически все известные зарубежные фирмы, производители электродов (Oerlikon, ESAB, Castolin, Thyssen, Bohler, Kestra, UTP и др.), имеют в своих программах выпуск по несколько марок алюминиевых электродов, и их количество из года в год возрастает. Положительный опыт применения электродов, выпускаемых этими фирмами, имеется и на предприятиях Украины. Однако высокая стоимость электродов ограничивает их использование в требуемых объемах.

В странах СНГ в промышленных масштабах в основном применяют покрытые электроды марок ОЗА-1, ОЗАНА-1 (для сварки технически чистого алюминия) и ОЗА-2, ОЗАНА-2 (для сварки силуминов), которые выпускает АО «Спецэлектрод», г. Москва. Однако из-за низкой прочности и высокой гигроскопичности покрытия, сильного разбрызгивания металла при сварке, плохой отделимости шлаковой корки, невысокого качества швов и необходимости высокотемпературного подогрева

рева свариваемого металла они не соответствуют современным требованиям.

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработаны покрытые электроды марки УАНА [1] для дуговой сварки и наплавки деталей и конструкций из деформируемых и литьевых алюминиевых сплавов. Основу покрытия составляют фториды и хлориды щелочных и щелочноземельных металлов. Поскольку жидкое стекло — традиционное связующее покрытий электродов, предназначенные для сварки стали, то под влиянием растворимых хлоридов и фторидов щелочных и щелочноземельных металлов коагулирует и теряет вязкующие свойства, в новых электродах использовано связующее, совместимое с сильными электролитами.

Рентгеноструктурным анализом на рентгеновском дифрактометре «Дрон-2» установлено, что

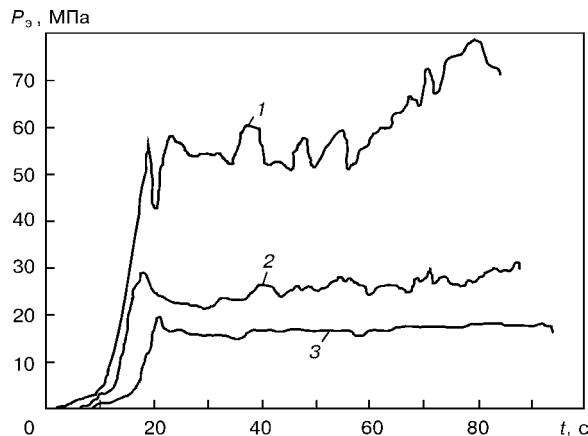


Рис. 1. Кривые экструзии обмазочной массы электродов  $P$ , серии УАНА в процессе ее перемешивания  $t$  (фильтра размерами  $4 \times 40$  мм при расходе массы  $Q = 1 \text{ см}^3/\text{с}$ ), мин: 1 – 26; 2 – 35; 3 – 45

**Таблица 1. Основные характеристики покрытых электродов для сварки алюминия и его сплавов**

Марка электрода	Марка проволоки	Диаметр проволоки, мм	Свариваемые сплавы	Рекомендуемый предварительный подогрев сплавов, °C
УАНА-1	СвА5	3,15; 4,0; 5,0; 6,3	АД00; АД0; АД1; АД	200...350
УАНА-2	СвАК5	3,15; 4,0; 5,0; 6,3	АД31; АД33; АД35; АЛ2; АЛ4; АЛ9 и др.	100...300

Таблица 2. Режимы сварки электродами серии УАНА

Параметр	Диаметр электрода, мм			
	3,15	4,0	5,0	6,3
Рекомендуемые* значения тока при положении шва, А:				
нижнем	80...110	100...130	130...160	160...180
вертикальном	80...100	90...130	120...150	150...170
Толщина свариваемого металла, мм	3...5	4...10	8...14	12...16
Рекомендуемая* температура предварительного подогрева, °С	100...200	100...250	100...350	100...350

\* Для сварки стыковых соединений листовых конструкций.

процесс приготовления обмазочной массы сопровождается химическими реакциями, протекающими между компонентами покрытия. В процессе взаимодействия образуются малорастворимые соли и высвобождается кристаллизационная влага. Выбраны оптимальные условия (продолжительность смешивания, порядок выдачи и доза связующего), обеспечивающие возможность протекания реакции и ее завершения к концу стадии приготовления обмазочной массы. Этим предотвращается опасность комкования и достигается требуемая стабильная во времени консистенция обмазочной массы (рис. 1). Готовая обмазочная масса характеризуется плавным режимом экструзии при опресовке электродов (рис. 1, кривая 3) и достаточно высокой прочностью покрытия на электроде.

Гигроскопичность покрытий электродов определяли по увеличению их массы  $\Delta W$  в результате поглощения влаги в гидростате с постоянной влажностью  $\Phi$ , которая составляла 84 % (насыщенный раствор бромистого калия при комнатной температуре).

Выбраны оптимальные условия термообработки электродов. Температура прокалки электродов составляет 250 °С. В этом случае достигается минимальная гигроскопичность покрытия. Дальнейшее повышение температуры прокалки не отражается на гигросорбционной способности покрытий (рис. 2), но приводит к резкому увеличению энергозатрат на изготовление электродов.

Повышение температуры прокалки  $T_{\text{пр}}$  до 250 °С улучшает сварочно-технологические свойства электродов, в частности способствует мелкокапельному переносу электродного металла. Длительность коротких замыканий, определяемая с

помощью информационно-измерительной системы АНП-2 [2], при этом снижается от 13,7 ( $T_{\text{пр}} = 100$  °С) до 12,0 ( $T_{\text{пр}} = 250$  °С) мкс. Такие же параметры переноса имеют, например, испытанные параллельно электроды марки 2101 Super фирмы «Castolin» (12,0 мкс) аналогичного назначения.

Основные характеристики алюминиевых электродов серии УАНА и режимы сварки приведены в табл. 1 и 2. Коэффициент наплавки составляет 6,0...6,8 г/(А·ч). Расход электродов на 1 кг наплавленного металла не превышает 2,0...2,2 кг.

Кромки металла перед сваркой рекомендуется подогревать газовым пламенем или в печи. Температуру предварительного подогрева выбирают в зависимости от марки сплава и толщины свариваемых деталей (табл. 2). Следует учитывать, что для алюминиевых сплавов режимы сварки и температура предварительного подогрева могут быть даны лишь ориентировочно, так как вследствие большой теплопроводности на выбор параметров сварки, кроме толщины металла и его химического состава, значительно влияют конфигурация и размеры изделий. Если при выборе температуры предварительного подогрева значения температуры для марки сплава (табл. 1) и для толщины свариваемого металла (табл. 2) отличаются между собой, то выбирается значение температуры предварительного подогрева, рекомендуемое для марки сплава.

Сварку алюминиевыми электродами выполняют на постоянном токе при обратной полярности. В качестве источников питания используют сварочные выпрямители типа ВДУ-306 с крутопадающей вольт-амперной характеристикой и плавной регулировкой напряжения на дуге. При двухсторонней сварке металла толщиной до 10 мм разделку свариваемых кромок обычно не производят. Шлак удаляют с помощью стальных щеток и горячей воды. Для исследования механических свойств сое-

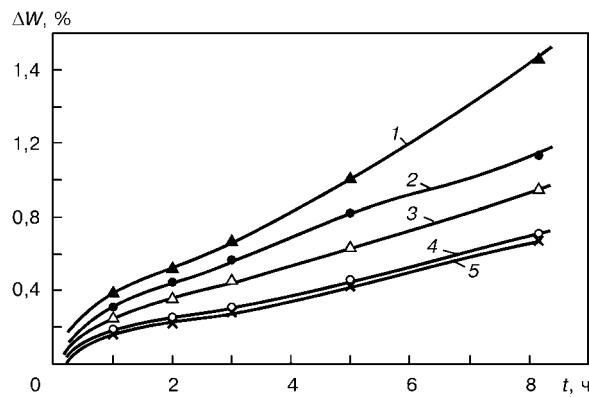


Рис. 2. Кинетика поглощения атмосферной влаги покрытием электродов серии УАНА, прокаленных при разных температурах: 1 — 100; 2 — 150; 3 — 200; 4 — 250; 5 — 300 °С

Таблица 3. Твердость HRB наплавленного металла при сварке сплава АЛ2 покрытыми алюминиевыми электродами

Марка электрода	HRB при $T$ , °С	
	20	200
УАНА-2 (5,8 % Si)	57...60	57...62
2101 Super (8,8 % Si)	59...62	60...62
OK 96.50 (9,1 % Si)	68...70	69...70

Примечание. Массовая доля кремния в основном металле составляет 11,4 %, твердость HRB сплава АЛ2 при температуре 20 °С — 49...50.

**Таблица 4. Механические свойства соединений алюминиевых сплавов, полученных ручной дуговой сваркой покрытыми электродами**

Марка сплава	Марка электрода	Температура предварительного подогрева, °C	Механические свойства		
			$\sigma_b$ , МПа	$a_u$ , Дж/см <sup>2</sup>	$\alpha$ , град
АД1	УАНА-1	20	<u>73,6...77,2</u> 75,4	<u>33...40</u> 39	<u>160...170</u> 165
		200	<u>72,4...78,6</u> 75,2	<u>43...45</u> 44	<u>180</u> 180
АД33	УАНА-2	20	<u>188,4...202,2</u> 198,4	<u>12...15</u> 13	<u>110...126</u> 118
		150	<u>192,6...202,2</u> 198,4	<u>15...17</u> 16	<u>155...165</u> 160
АЛ9	УАНА-2	20	<u>172,4...180,6</u> 176,2	<u>1,1...1,3</u> 1,2	<u>10...12</u> 11
		200	<u>180,2...195,6</u> 186,4	<u>1,9...2,2</u> 2,0	<u>13...15</u> 14
	2101 Super	20	<u>178,2...186,4</u> 182,8	<u>1,2...1,4</u> 1,3	<u>10...12</u> 11
		200	<u>182,6...198,4</u> 190,2	<u>2,0...2,4</u> 2,2	<u>12...15</u> 14

**Примечание.** В числителе приведены минимальные и максимальные значения, в знаменателе — средние значения по результатам испытаний 5...9 образцов.

динений, полученных ручной дуговой сваркой покрытыми электродами, использовали листы деформируемых сплавов марки АД1 и АД33 толщиной 6 мм и литейные сплавы марки АЛ2 и АЛ9 толщиной 8 мм. Для проведения сравнительной оценки качества электродов применяли также зарубежные алюминиевые электроды марки ОК 96.50 фирмы ESAB и 2101 Super фирмы «Castolin». Во всех случаях диаметр электронной проволоки составлял  $\leq 3,2$  мм. Одностороннюю ручную сварку выполняли при комнатной температуре и с предварительным подогревом основного металла до 200 °C. Твердость наплавок определяли на приборе Роквелла шариком диаметром 1/16 дюйма при нагрузке 600 Н.

Исследования показали, что твердость основного металла сплава АЛ2 на 8...10 единиц ниже, чем твердость наплавленного металла (табл. 3). Несколько большая твердость швов, полученных электродами марки ОК 96.50 и 2101 Super, обусловлена повышенным содержанием в них кремния.

Установлено также, что предварительный подогрев свариваемых сплавов снижает общее количество пустот в швах и несколько повышает механические свойства соединений (табл. 4). При этом сварные соединения (с выпуклостью швов с одной или двух сторон) разрушаются по зоне сплавления шва с основным металлом или по основному

металлу (сплав АД33). После снятия выпуклости (с двух сторон) образцы разрушаются по шву.

Электроды УАНА обеспечивают достаточно высокую стабильность горения дуги, хорошее формирование шва, в том числе в вертикальном положении, легкую отделимость шлаковой корки и высокие значения механических свойств металла шва. Покрытие электродов характеризуется низкой гигроскопичностью и высокой механической прочностью.

Электроды поставляются во влагонепроницаемой упаковке. Перед сваркой они прокаливаются при температуре 150...200 °C в течение 1,0...1,5 ч. Прокаленные электроды должны храниться в герметичной упаковке. Время между прокалкой и сваркой не должно превышать 24 ч. Опытное производство небольших партий новых электродов (массой до 200 кг) освоено в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, а промышленная технология производства электродов УАНА-1 и УАНА-2 — АО «Спецэлектрод», г. Москва.

1. Скорина Н. В., Машин В. С. Покрытые электроды для ручной дуговой сварки алюминия и его сплавов // Сварщик. — 2000. — № 2. — С. 26, 32.
2. Применение системы АНП-2 для измерения электрических и временных параметров сварочного контура // И. К. Поздняхина, И. И. Заруба, В. В. Андреев и др. // Информ. материалы СЭВ. — 1985. — Вып. 2. — С. 68-70.

Characteristics and some peculiarities of the technology of manufacture of covered electrodes for manual arc welding of aluminium and aluminium alloys developed by the E.O.Paton Electric Welding Institute are presented. The necessity of completion of chemical reactions occurring in preparation of the covering mixture to stabilise its extrusion in moulding is shown. The optimal baking temperature of electrodes to ensure low susceptibility of coverings to absorption of atmospheric moisture was determined

Поступила в редакцию 04.09.2002

# КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ ПЛАЗМЕННОЙ И ДУГОВОЙ СВАРКИ РАЗНОПОЛЯРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ТОКА («ГИДРА-ПРОЦЕСС»)

**Н. М. ВОРОПАЙ**, д-р техн. наук, **В. А. МИШЕНКОВ**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработан процесс однородной плазменной и дуговой сварки алюминиевых сплавов толщиной 10...30 мм, предусматривающий подачу импульсов тока (обратная полярность) на первый и третий по ходу сварки неплавящиеся (вольфрамовые) электроды, а в промежутках между ними — импульсов тока (прямая полярность) на средний плазмотрон. Приведены схема устройства для реализации процесса и его технологические возможности.

**Ключевые слова:** дуговая сварка, плазменная сварка, комбинированный способ, алюминиевые сплавы, проплавление металла, форма швов, свойства сварных соединений

Термин «гидра», впервые введенный в сварочную терминологию в 2001 г. [1–3], обозначает использование нескольких источников сварочного нагрева (плазма+дуга, лазер+дуга), образующих общую либо раздельные сварочные ванны. В работе [4] описан реализованный германской фирмой «Мюнхенгладбах» плазменно-дуговой процесс «гидра» с двумя и тремя горелками ТИГ и одним плазмотроном для высокоскоростной сварки продольных швов труб из нержавеющей стали толщиной 0,8...3,5 мм. Оригинальные конструкции моноблока горелок и плазмотрона, электромагнитная и газовая стабилизация горения дуг и микропропцессорные системы управления технологическим циклом позволили достичь скорости сварки до 800 м/ч при отличном качестве труб и бесперебойной работе оборудования.

Применительно к однопроходной сварке легких металлов и сплавов увеличенной толщины (10...30 мм) в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины создан процесс сварки «гидра» (рис. 1) с двумя неплавящимися (вольфрамовыми) электродами 1, 3 и расположенным между ними плазмотроном 2. Процесс предусматривает подачу импульсов тока при об-

ратной полярности на вольфрамовые электроды, а в промежутках между ними — на плазмотрон импульсами тока при прямой полярности. Роль дуги первого вольфрамового электрода 1 сводится к катодной очистке от оксидов поверхности свариваемых кромок и присадочной проволоки, расплавлению присадочной проволоки и предварительному подогреву основного металла. Плазмотрон 2, питаемый относительно мощными импульсами тока при прямой полярности, обеспечивает глубокое проплавление свариваемого металла. Дуга электрода 3 служит для улучшения формирования швов, устранения краевых подрезов и получения плавных переходов от шва к основному металлу.

Для осуществления процесса сварки «гидра» разработан специализированный источник питания (рис. 2), содержащий два сварочных трансформатора 1 и 2, начало вторичных обмоток которых через диоды 3–6 подключено к электродам 7, 9 и плазмотрону 8, а концы вторичных обмоток через регулируемые активные сопротивления 10 и 11 и высокочастотный дроссель 12 — к изделию 13. В схеме источника предусмотрен стартовый возбудитель дуг 14, подключенный к каждому из электродов, и два блока 15, 16, служащих для поддержания стабильного горения дуг между электродами и изделием. После возбуждения обеих дуг стартовый возбудитель отключается и дальнейшее

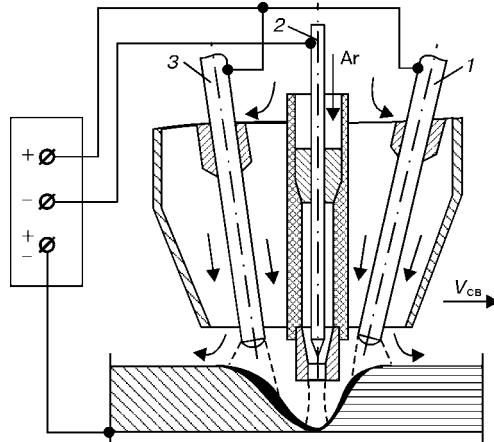


Рис. 1. Схема процесса плазменной и дуговой сварки «гидра» (обозначения поз. 1–3 приведены в тексте)

© Н. М. Воропай, В. А. Мишенков, 2002

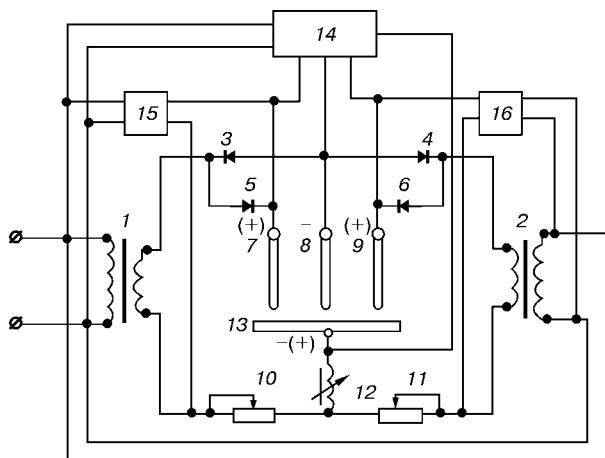


Рис. 2. Принципиальная схема устройства для плазменной и дуговой сварки (обозначения поз. 1–16 приведены в тексте)

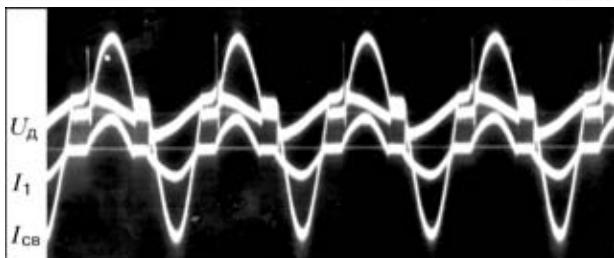


Рис. 3. Осцилограммы сварочного тока  $I_{cv}$ , тока в первичной обмотке трансформатора  $I_1$  и напряжения на дуговом промежутке  $U_d$  при  $I_{np}/I_{obr} = 2/1$

их повторное зажигание осуществляется в начале каждого положительного полупериода между электродами 7 и 9, а также изделием 13 с помощью блоков 15 и 16. Для защиты сварочных цепей от тока высокой частоты служит дроссель 12.

Описанный источник питания и моноблок горелок и плазмотрона обеспечивают стабильное протекание процесса сварки асимметричным разнополярным током практически без замагничивания вторичных обмоток сварочных трансформаторов (рис. 3). Увеличение коэффициента асимметрии тока приводит к перераспределению мощности источников нагрева в анодной и катодной частях периода с повышением доли тепла, выделяющегося в основном металле, и снижением доли тепла, идущего на нагрев вольфрамового электрода [5].

Технологические испытания процесса сварки «гидра» производили при выполнении однопроходных швовстыковых соединений алюминиево-магниевого сплава АМг6. Для металла толщиной 25 мм первый по ходу сварки вольфрамовый электрод диаметром 6 мм питали положительными относительно изделия импульсами тока ( $I_{\text{зф}} = 150 \text{ A}$ ). Такими же импульсами тока питали второй вольфрамовый электрод. В промежутках между ними на плазмотрон подавали импульсы тока при прямой полярности ( $I_{\text{зф}} = 300 \text{ A}$ ). Скорость сварки составляла 12 м/ч, диаметр присадочной проволоки — 3 мм, суммарный расход защитного и плазмообразующего газа (аргона) — 30 л/мин. Макрошлифы полученных сварных соединений характеризуются благоприятной формой швов (рис. 4). При этом ширина швов соизмерима с толщиной свариваемого металла. Механические свойства металла сварных соединений находятся на уровне свойств основного металла в отожженном состоянии. Процесс плазменной и дуговой сварки «гидра» после дополнительных испытаний может быть рекомендован для изготовления корпусов ракет, алюминиевых цистерн транспортного и химического машиностроения, крыльевых устройств

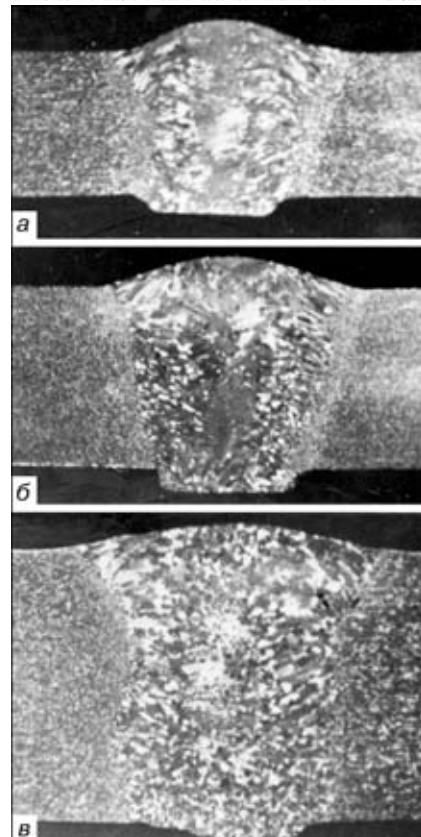


Рис. 4. Макрошлифы швов сплава АМг6 толщиной 10 (а), 14 (б) и 25 (с) мм

судов на воздушной подушке и других изделий из алюминиевых сплавов. Представляет практический интерес изучение технологических возможностей разработанного процесса для сварки углеродистых и легированных сталей, других цветных металлов и сплавов.

1. Wieschmann A. Entwicklung des Hibrid – und Hidraschweißverfahrens am Beispiel des Schiffbaus. — Aachen, 2001. — 160 S.
2. Diltthey V., Wieschmann A., Keller H. CO<sub>2</sub> – Laser – MSG – Hybrid und – Hidra – Schweißen // Inovative Fügeprozesse für den Schiffbau, Laser Opto. — 2001. — 33, № 2. — S. 56–63.
3. Diltthey V., Keller H. Einsatz der Hibrid – und Hidra-Schweißverfahren zur Wirtschaftlichkeit – steigerung im Schiffbau // Schweißen und Schneiden 2001: Vorträge der gleichnamigen Großen Schweißtechnischen Tagung (Essen, 11–13 Sept., 2001). — Düsseldorf: DVS, 2001. — S. 56–62.
4. Czuyack A. Stand und Entwicklungstendenzen bei der Herstellung längsnahrgeschweißter Qualitäts – Edelstahlrohre // Ibid. — S. 112–116.
5. Рабкин Д. М., Воропай Н. М., Мишенков В. А. Энергетические характеристики процесса сварки на асимметричном разнополярном токе // Автомат. сварка. — 1978. — № 4. — С. 5–10.

The process of plasma-arc welding of aluminium alloys 10...30 mm thick has been developed. The process provides for feeding the reverse-polarity current pulses to the first and third tungsten electrodes as welding progresses and, in the intervals between them, feeding the direct-polarity current pulses to the central plasmatron. Schematic of the device for implementation of the process is shown and its technological capabilities are described.

Поступила в редакцию 17.10.2002,  
в окончательном варианте 28.10.2002



# МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОРРЕКТИРУЮЩИХ ДЕЙСТВИЙ ПРИ СТАТИСТИЧЕСКОМ РЕГУЛИРОВАНИИ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

И. А. ТАРАРЫЧКИН, канд. техн. наук (Восточноукр. нац. ун-т, г. Луганск)

Предложена методика одновременного построения карт контроля состояния и относительной точности для определения характера корректирующих действий, направленных на восстановление нарушенной точности технологического процесса. Рассмотрены возможности методики на примере выполнения кольцевого шва с использованием технологии дуговой сварки в узкий зазор.

**Ключевые слова:** сварка в узкий зазор, статистическое регулирование, качество продукции, точность процесса, методика, корректирующие действия, карты контроля, критерии точности

Статистическое регулирование сварочных технологических процессов является одним из эффективных средств обеспечения качества продукции [1, 2]. Выбор конкретного метода регулирования осуществляют в зависимости от условий производства и природы контролируемой характеристики качества. В условиях крупносерийного и массового производства для контролируемых характеристик, имеющих количественную природу, регулирование процессов производят с применением контрольных карт средних арифметических значений, среднеквадратических отклонений, размахов [3].

При единичном и мелкосерийном производстве статистическое регулирование процесса следует выполнять с использованием карт контроля состояния, которые позволяют своевременно обнаруживать нарушение точности контролируемого процесса [4]. Однако непосредственное применение карт контроля состояния не дает ответа на вопрос о том, какого рода корректирующие действия должны быть выполнены для восстановления нарушенной точности.

В настоящей публикации изложена методика, позволяющая определять характер необходимых корректирующих действий, направленных на восстановление нарушенной точности контролируемого процесса, если статистическое регулирование осуществляют с использованием карт контроля состояния. Применяемые нами обозначения соответствуют принятым в работе [4].

Рассмотрим особенности протекания трех различных технологических процессов, представленных на рис. 1 (схемы 1–3). Отметим, что использование комплексного критерия точности  $g_S = \theta + \eta$  для построения карт контроля состояния в соответствии с методикой, представленной в работе [4], позволяет получить одну и ту же систему ломаных линий для моментов времени  $t_1, t_2, \dots, t_5$  при описании состояния указанных процессов (рис. 2, a). Точность всех этих процессов



Рис. 1. Различные схемы протекания технологических процессов, представленные в системе координат  $\theta\eta$

© И. А. Тарапычkin, 2002

в момент времени  $t_5$  оказывается нарушенной различным образом, однако непосредственное использование критерия  $g_S$  не позволяет установить причину нарушений.

Для того чтобы сформулировать количественный критерий, позволяющий характеризовать состояние контролируемого процесса вблизи границы предельного состояния  $AB$  (рис. 1), следует определиться относительно используемой терминологии. Так, в дальнейшем характеристики точности процесса  $\theta$  и  $\eta$  считаются соизмеримыми, если их значения отличаются не более чем в 2 раза. Тогда область  $E_2$  соизмеримых значений  $\theta$  и  $\eta$  на плоскости  $\theta\eta$  будет расположена между двумя лучами, описываемыми уравнениями  $\theta = 0,5\eta$  и  $\theta = 2\eta$  (рис. 1).

Положение произвольной точки  $Z_i$ , характеризующей текущее состояние процесса относительно областей  $E_1, E_2, E_3$ , может быть установлено с использованием критерия относительной точности процесса  $g_E$ :

$$g_E = \frac{\theta}{\eta} = \frac{\sqrt{2} |\bar{x} - W_0|}{S \Phi^{-1}(P)}.$$

Для области  $E_1$  выполняется условие  $g_E \geq 2$ . Переход процесса в эту область следует рассматривать как результат пре-

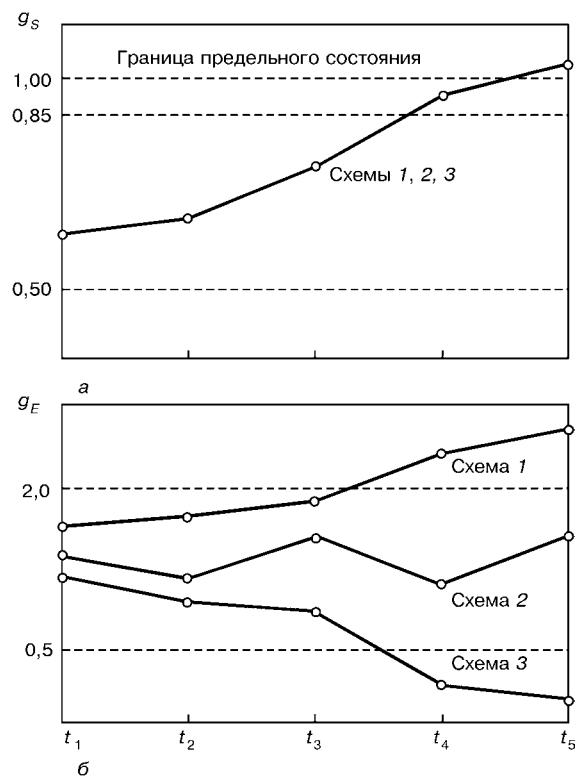


Рис. 2. Карты контроля состояния (a) и относительной точности (b) процессов, протекающих по различным схемам

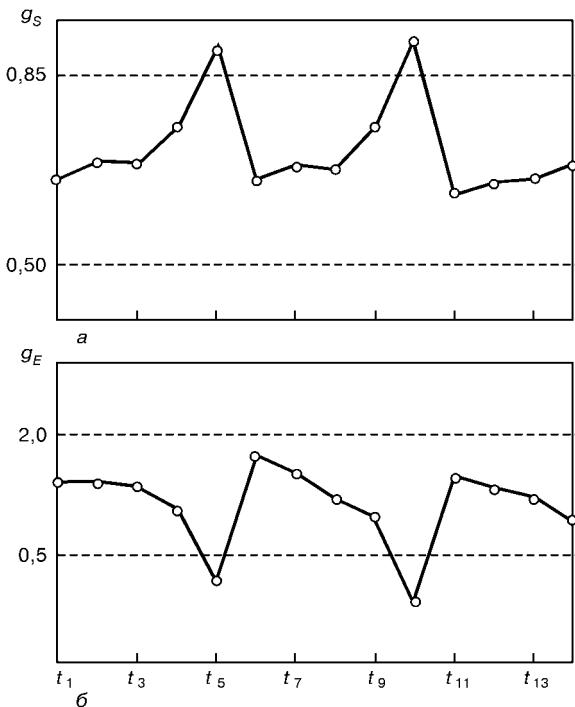


Рис. 3. Карты контроля состояния (а) и относительной точности (б) многомерного процесса сварки в узкий зазор с контролем по скорости сварки имущественного рассеяния контролируемой характеристики качества.

Для области  $E_3$  выполняется условие  $g_E \geq 0,5$  и переход процесса в эту область следует понимать как результат преимущественного смещения центра рассеяния контролируемой характеристики качества.

При выполнении условия  $0,5 < g_E < 2$  (область  $E_2$  значений  $\theta$  и  $\eta$ ) имеет место соизмеримое увеличение значений коэффициентов смещения настройки и рассеяния, приводящее к нарушению точности процесса.

Обозначенные подходы позволяют сформулировать следующую методику определения характера управляющих воздействий при статистическом регулировании технологических процессов:

состояние процесса оценивается периодически для установленных моментов времени  $t_i$  с построением карты контроля состояния в виде системы отрезков, последовательно соединяющих точки  $g_S(t_i)$  [4];

для тех же моментов времени  $t_i$  выполняется одновременное построение карты контроля относительной точности процесса в виде системы отрезков, последовательно соединяющих точки  $g_E(t_i)$ ;

в случае, если с момента времени  $t_j$  выполняется условие  $g_S(t_j) > 0,85$ , то для восстановления точности процесса следует произвести корректирующие действия, характер которых определяется по внешнему виду карты контроля относительной точности (если  $g_E(t_j) \geq 2$ , то это должны быть действия, ориентированные преимущественно на уменьшение рассеяния значений контролируемой характеристики качества; если  $g_E(t_j) \leq 0,5$ , то действия должны быть в основном ориентированы на уменьшение смещения величины  $X$  относительно центра конструкторского поля допуска; если  $0,5 < g_E(t_j) < 2$ , то принимаемые меры должны быть направлены на одновременное уменьшение как рассеяния величины  $X$ , так и на восстановление ее положения относительно середины поля допуска).

Совмещенный вид карт контроля относительной точности  $g_E(t_j)$  для процессов, протекающих по схемам 1–3, представлен

на рис. 2, б, из которого видно, что характер корректирующих действий, направленных на восстановление нарушенной точности для каждого из рассматриваемых процессов оказывается различным и устанавливается в соответствии с изложенной методикой.

Предложенный метод совместного построения карт контроля состояния и относительной точности позволяет повысить эффективность статистического регулирования сварочных технологических процессов в условиях единичного и мелкосерийного производства, что следует пояснить конкретным примером.

Обеспечить качественное формирование многослойного кольцевого шва при сварке в узкий зазор обечайки с внутренним диаметром 1 м и толщиной стенки 75 мм можно только в условиях постоянного контроля за состоянием многомерного процесса [4]. При этом поддержание в заданном диапазоне параметров режима является важным условием обеспечения качества и предотвращения образования дефектов формы (подрезы и несплавления).

Изменение значений параметров режима в процессе сварки может быть обусловлено воздействием как факторов случайной природы, так и систематических причин. Рассматривая процесс непрерывного заполнения разделки, следует отметить, что изменение значений скорости сварки  $v_{cb}$  может быть связано не только с колебаниями угловой скорости привода вращения и несовпадением оси вращения с осью цилиндрической обечайки, но и с постепенным вертикальным смещением горелки. Перемещение такого рода при заполнении разделки может привести к увеличению  $v_{cb}$  на 15 % относительно номинала.

В соответствии с требованиями технологии отклонение скорости сварки от номинального значения по абсолютному значению не должно превышать 6 %. По этой причине параметр  $X = v_{cb}$  необходимо контролировать в процессе сварки, выполняя в случае необходимости корректирующие действия.

Карты контроля состояния и относительной точности процесса представлены на рис. 3. Как следует из рисунка, приближение процесса к границе предельного состояния зафиксировано в моменты времени  $t_5$  и  $t_{10}$ . Управляющие воздействия в этих случаях были связаны с восстановлением точности процесса за счет соответствующего уменьшения угловой скорости привода вращения обечайки. При этом условие его удовлетворительного протекания с контролем точности по скорости сварки не было нарушено в течение всего периода заполнения разделки.

Рассмотренный пример наглядно демонстрирует те дополнительные возможности, которые возникают в рамках совместного использования сформулированных статистик  $g_S$  и  $g_E$  при документировании, оценке состояния и прогнозировании хода процесса. Однако эффективное применение критериев  $g_S$  и  $g_E$  оказывается возможным и в тех случаях, когда отсутствуют требования к документированию хода процесса, поскольку их текущие значения могут быть использованы при решении задач оперативного контроля и управления сварочными процессами в реальном масштабе времени.

1. Контроль качества сварки / В. Н. Волченко, А. К. Гурвич, А. Н. Майоров и др. — М.: Машиностроение, 1975. — 328 с.
2. Гончаров Э. Н., Козлов В. В., Круглова Е. Д. Контроль качества продукции. — М.: Изд-во стандартов, 1987. — 120 с.
3. Статистические методы контроля качества продукции / Л. Ноулер, Дж. Хауэлл, Б. Голд и др. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 104 с.
4. Тарарыкин И. А. Статистическое регулирование сварочных технологических процессов с использованием метода построения карт контроля состояния // Автомат. сварка. — 2001. — № 10. — С. 33–36.
5. Вейнцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Физматгиз, 1962. — 564 с.

Method for simultaneous plotting the state control and relative accuracy cards to determine the character of correcting actions intended for restoration of the disturbed accuracy of the technological process is suggested. Capabilities of the method are considered by an example of making a circumferential weld using the narrow-gap arc welding technology.

Поступила в редакцию 14.12.2001,  
в окончательном варианте 01.04.2002



# ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫЙ ТЕПЛОСТОЙКИЙ ПРИПОЙ ДЛЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАЙКИ

В. Ф. ХОРУНОВ, д-р техн. наук, О. М. САБАДАШ, инж., С. В. МАКСИМОВА, канд. техн. наук,  
Б. В. СТЕФАНИВ, инж. (Ин-т электросварки им Е. О. Патона НАН Украины)

Изучены методы получения, свойства и микроструктура дисперсно-упрочненного припоя Sn-39Pb. Определена кратковременная прочность паяных соединений, выполненных дисперсно-упрочненным припоеем, в зависимости от количества упрочняющей фазы.

**Ключевые слова:** низкотемпературная пайка, паяные соединения, кратковременная прочность, дисперсная упрочняющая фаза, микроструктура, композиционный припой, медь

Современные электронные узлы должны надежно работать при высоких термических нагрузках — до 120...150 °C. Для этого необходимо получить в зоне соединения определенную структуру, обеспечивающую прочность при рабочей температуре. При этом для хорошего формирования паяных соединений припой не должен иметь чрезмерно высокую температуру плавления.

Повысить термопрочность паяных соединений можно различными способами: проводить обработку паяных соединений при повышенной температуре, получая за счет диффузии « растворный» шов [1]; применять припой с частично испаряющимися при пайке компонентами-депрессантами [2]; обеспечивать условия, при которых депрессанты могли бы связываться в устойчивые химические соединения [3] с целью повышения температуры пайки соединения.

Требуемая термопрочность паяных соединений также может быть достигнута за счет новых припойных материалов, которые в отличие от применяемых припоеv состоят из металлической матрицы (собственно припоя) и упрочняющих частиц (тонкодисперсных частиц из металлов, неметаллов, химических соединений).

Установлено [4], что если ввести в припой системы Sn-Pb с массовой долей олова 40, 63 и 90 % никель с чистотой 99, 94 в виде порошка в количестве 1, 3, 5, 10 и 15 %, то сопротивление срезу соединений, паяных припоеем Sn-27Pb-10Ni, возрастает в 1,5 раза (45 МПа) по сравнению с соединениями, паянными припоями, не содержащими никель. Заметное увеличение прочности паяных соединений при нормальной температуре наблюдается при введении в оловянно-свинцовый припой более 5 % Ni.

Упрочненные паяные соединения получали в процессе пайки эвтектическим припоеем Sn-39Pb за счет применения флюса, который содержал 20...80 % медного порошка в виде тонких частиц размером менее 44 мкм [5]. Флюс перед пайкой наносился на паяемую поверхность деталей, после расплавления припоя жидкий расплав растекался, смачивая частицы упрочняющей фазы, образуя таким образом композиционное паяное соединение. Разрушение соединений, паянных припоеем с 66 % медного порошка, происходило при заданной нагрузке (5 МПа) в течение 4,0 тыс. ч. тогда как соединения, паянные припоеем Sn-50Pb, при той же нагрузке, разрушались через 1,5 тыс. ч.

Таким образом, введение компонентов (частиц), имеющих градиент химического потенциала относительно матричного сплава, позволяет решить комплекс специальных задач — улучшить электропроводность, повысить прочность, достигнуть необходимой коррозионной или радиационной стойкости и т. п.

Упрочнение возникает при введении в матричный сплав тонкодисперсных частиц определенной химической природы. Кроме того, следует учитывать, что для сохранения технологических свойств припоя количество частиц упрочняющей фазы должно быть относительно малым. Для повышения термостойкости эвтектического припоя Sn-39Pb предложены два механизма упрочнения: дисперсионного твердения и дисперсного

упрочнения. Во втором случае значительно возрастает потенциальная возможность использования отдельных элементов и интерметаллидных соединений для образования мелкодисперсных фаз в матричном сплаве. Форма, дисперсность и относительное расположение упрочняющей фазы зависит от многих факторов, связанных с химическим составом расплава и условиями кристаллизации.

В соответствии с выбранным направлением исследования необходимо определить способы металлогургического растворения и распределения в металлической матрице эвтектического припоя (Sn-39Pb) упрочняющих частиц из интерметаллида Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>, а также характеристики кратковременной прочности соединений из меди, паяемых разрабатываемыми припоями при комнатной и повышенной (120 °C) температуре.

Для определения оптимального способа введения упрочняющих частиц в матрицу низкотемпературных эвтектических припоеv были опробованы два способа выплавки на высокочастотной установке ВЧГ1/0,066 мощностью 60 кВ·А с рабочей частотой 66 кГц (под флюсом ПВ209):

введение твердых упрочняющих частиц размером менее 10 мкм в матричный расплав в диапазоне 600...750 °C при выплавке припоя в графитовом тигле и электромагнитном перемешивании (система твердые упрочняющие частицы—расплав эвтектического припоя);

введение упрочняющих частиц при слиянии двух жидких расплавов при температуре выше температуры ликвидуса материалов упрочняющих частиц (система расплав упрочняющих частиц—расплав эвтектического припоя).

Образцы из припоеv вырезали механическим способом, затем подвергали зачистке, полировке с применением абразивных паст, промывке в ацетоне и этиловом спирте, сушке и травлению для выявления тонкой структуры.

Металлографические исследования исходных сплавов системы Sn-Pb проводили с помощью оптической растровой электронной микроскопии (оптический микроскоп «Неофот-8» и сканирующий электронный микроскоп ISM-840).

Использовалистыковые образцы из меди марки М1 (99,9 % Cu), паяные проводом ПЭТВ-2 и покрытые двойным слоем термостойкого лака диаметром 1,8 мм и длиной 80 мм. Пайку стыковых образцов из меди проводили с помощью специального устройства (рис. 1). Заготовки из меди для одновременной пайки трех образцов располагали на нагревательной плате соответствующих размеров из материала с высокой теплопроводностью и температуропроводностью (алюминия), не смачиваемого припоеем при температуре пайки. Температуру нагрева платы под-

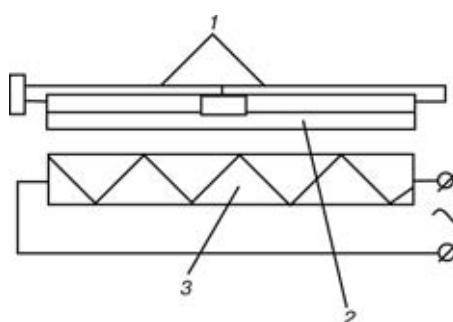


Рис. 1. Схема устройства для пайки образцов: 1 — стыковые образцы из меди; 2 — плита из алюминия; 3 — нагреватель

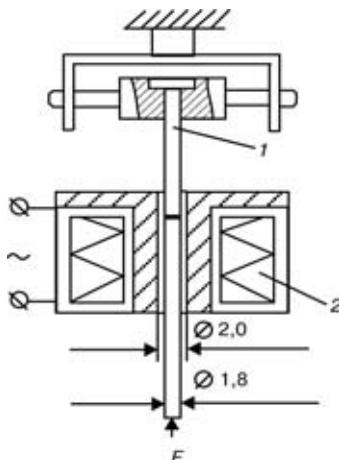


Рис. 2. Схема нагружения паяных соединений: 1 — образцы стыкового соединения; 2 — нагреватель

держивали постоянной  $(230 \pm 3)^\circ\text{C}$ . Время нагрева образцов до температуры пайки было установлено экспериментально — 60 с. На заготовку припоя флюс (ортофосфорная кислота) нанесли путем окунания, а затем припой вручную вводили в паяльный зазор, который составлял 0,1...0,3 мм. Время пайки с момента заполнения припоям паяльного зазора составляло не более 5 с. Затем образцы в зоне пайки охлаждали водно-спиртовым раствором.

Паяные образцы после визуального контроля подвергали испытаниям на растяжение (рис. 2) на испытательной машине РМУ-0,05 (максимальное усилие на разрыв 500 Н). Скорость приложения нагрузки при всех видах испытаний была равна 1 мм/мин. Значения прочности паяного соединения при испытании на разрыв определяли по результатам испытаний шести образцов. Температура испытаний для оловянно-свинцовых припоеv составляла  $120^\circ\text{C}$ .

Микрорентгеноспектральным анализом установлено, что микроструктура матричного сплава Sn-Pb представляет собой твердый раствор на основе олова и свинца.

При использовании первого способа выплавки сплавов, при котором твердые мелкодисперсные частицы добавляются в жидкий расплав, поставленная цель достигнута не была. Частицы распределялись неравномерно и создавали грубые конгломераты. Благодаря второму способу удается достичь однородного распределения упрочняющей фазы — дисперсных частиц интерметаллида  $\text{Ni}_3\text{Sn}_4$ .

Результаты сравнительных испытаний кратковременной прочности соединений из меди, паянных припоями ПОС-61 и опытными, представлены на рис. 3. На основании полученных данных можно сделать вывод, что разработанный компози-

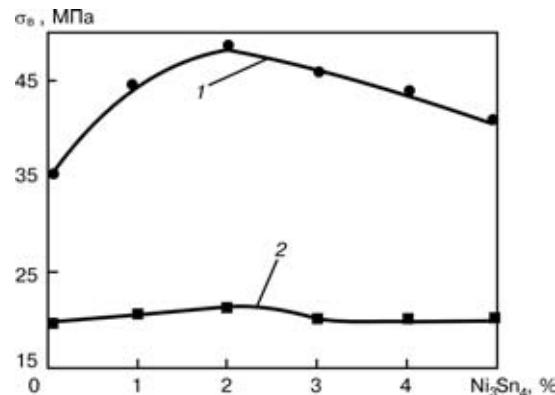


Рис. 3. Кратковременная прочность  $\sigma_0$  паяных соединений при различной температуре испытаний: 1 —  $120^\circ\text{C}$ ; 2 —  $20^\circ\text{C}$

ционный припой позволил не только получить необходимую прочность паяных соединений при температуре  $120^\circ\text{C}$ , но и несколько увеличить ее при комнатной температуре. Наибольшее повышение прочности при  $120^\circ\text{C}$  наблюдалось у соединений, паянных припоями, содержащими 2 % упрочняющих частиц интерметаллида  $\text{Ni}_3\text{Sn}_4$ . Дальнейшее повышение содержания упрочняющих частиц интерметаллида нежелательно, поскольку происходит заметное снижение прочности паяных соединений.

## Выходы

1. Определен перспективный способ получения низкотемпературных композиционных припоеv с достаточно равномерным распределением мелкодисперсной интерметаллидной фазы в матрице.

2. Установлено, что использование композиционного припоя Sn-39Pb с 2 % упрочняющих интерметаллидных частиц позволяет получить необходимую прочность паяных соединений при  $120^\circ\text{C}$ .

1. Scheward G. E., Adam R. Research on re-melt temperature in any system of filler metals utilizing in industry // First intern. conf. on brazing and soldering, London, 1972. — London: Brit. Assoc. Braz. and Sold., 1972. — P. 11-20.
2. Bred H. Development the partially volatile brazing filler metals // Welding J. — 1964. — **43**, № 2. — P. 63-65.
3. Кавакацу И. Развитие разработок припоеv и технологии пайки // Kinzoku. — **43**, № 5. — С. 60-64.
4. Лашко С. В., Лашко Н. Ф. Пайка металлов. — М. : Машиностроение, 1988. — 376 с.
5. Pat. 3488071 USA. Reinforced soft solder joints / B. Raynes, P. Pike, M. Pescatrice. — Publ. 06.01.70.

Methods for production, properties and microstructure of dispersion-strengthened brazing filler alloy Sn-39Pb have been studied. Short-term strength of the brazed joints made using the dispersion-strengthened filler alloy, depending upon the content of the strengthening phase, has been determined

Поступила в редакцию 04.07.2002



## ПО ЗАРУБЕЖНЫМ ЖУРНАЛАМ\*



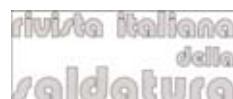
(Румыния), 2001. — № 4 (рум. яз.)

**Oanca O., Botila L.** Анализ ультразвуковой сварки металлических материалов, с. 5–13.**Verbitchi V., Cojocaru R., Radescu D.** Экспериментальный роботизированный сварочный участок для подвижного железнодорожного состава, с. 14–20.

(Румыния), 2002. — № 1 (рум. яз.)

**Farbas N.** Приоритетные направления в области научно-исследовательских разработок румынского Института сварки и испытания материалов, с. 3–8.**Hobbacher A.** Направления в области науки и технологии сварки и соединения экономичных и надежных изделий, с. 9–20.

(Румыния), 2002. — An/Year XII, № 1 (рум. яз.)

**Benhes C., Parvu M.** Процесс резки и подводной резки с помощью кумулятивных зарядов, с. 51–54.**Petrescu M.G., Neacsu A., Petrescu D.** Вклад в исследование общей термообработки применительно к сферическим резервуарам. Ч. 1, с. 55–61.NIPPON STEEL  
TECHNICAL REPORT (Япония),  
2002. — № 85 (англ. яз.)**Shiraishi T., Haraguchi Y., Ichimoto T.** Технология предупреждения микротреции при холодной tandem-прокатке чистого титана, с. 54–58.**Fujii H. et al.** Разработка недорогого процесса порошковой металлургии для изделий из сплавов титана, с. 77–81.**Kinoshita K., Saito A., Doi K.** Предупреждение коррозии с помощью покрытия из петролатума с титановой облицовкой, с. 94100.

(Италия), 2002. — № 1 (итал. яз.)

**Allen D.J., Servetto C.** Характеристика ползучести материалов и сварных соединений, применяемых на теплоэлектростанциях — использование стали стали E911, с. 19–26.**Raspa A.** Сварка алюминия с помощью Nd-ИАГ лазера, с. 31–34.**Costa G., Scasso M.** Разработка в области сварки, с. 37–39.**Cappello A.** Износостойкие плиты, наплавленные сваркой открытой дугой или металлизацией, изготавливаемые фирмой КАСТОЛЕН, с. 41–45.**Ginocchio M.** Основные критерии оценки распределения напряжений компонентов конструкций различных форм, подверженных нагрузке давлением, анализ методом конечных элементов, с. 49–54.**Linciotti A.** Метод анализа конструкционных напряжений — простой и эффективный метод оценки усталостной долговечности точечных сварных соединений, с. 59–67.**Farrar J.C.M., Marschall A.W., Zhang Z.** О влиянии вибрации на свойства изделий нержавеющей стали, сваренных по рошковой проволокой и работающих при повышенных температурах, с. 71–78.**Методы** приварки электронных компонентов к печатным платам, с. 81–88.

(Италия), 2002. — № 2 (итал. яз.)

\* Раздел подготовлен сотрудниками научной библиографии ИЭС им. Е. О. Патона. Более полно библиография представлена в Стальной информации (СИ) «Сварка и родственные технологии», издаваемой в ИЭС и распространяемой по заявкам (заказ по тел. (044) 227-07-77, НТБ ИЭС)

**Tovo R., Gambaro C., Volpone M.** Сварка трением с перемешиванием — новейшая технология соединения, с. 161–168.**Costa G., Tolle E.** Международная и европейская стандартизация в области обучения, аттестации и сертификации персонала, работающего в области неразрушающего контроля, с. 171–174.**Franceschi E. et al.** Исследование доисторического лигурийского топора из бронзы, найденного вблизи Сасселло, с. 177–183.**Bergmann J. P. et al.** Обзор механических свойств торцевых стыковых швов алюминиевых сплавов, austenитных сталей и промышленного титана, с. 187–195.**Abbate A., Lanza M.** Оценка взаимодействия механизмов, работающих на линии по производству труб, с. 199–212.**Cnirss G.** Сварка и термообработка соединений из различных материалов, с. 219–231.**Опасность** и предупреждение несчастных случаев при сварке, с. 235–242.

(Германия), 2002. — № 4 (нем. яз.)

**Pleibach F.-C., Stocker J.** Автогенная техника в металлообрабатывающей промышленности, с. 114, 116–119.**Schuster J., Neuhauser M.** Немножко металловедения для домашнего хозяйства, с. 120–124.**Trillmich R.** Комбинация материалов в приварке шпилек, с. 126, 128, 130–132.**Bach F.-W. et al.** Автогенная резка высокого давления для фасонных деталей и разделки кромок, с. 134–135, 137.**Cramer K.** Ремонтная сварка, с. 138, 140–141.

(Германия), 2002. — № 5 (нем. яз.)

**Heidenreich B., Schone A.** Автоматизация и мехатроника — основные темы сварочного конгресса в ноябре 2001 г. в Бремене, с. 146–148.**Oster E., Hofmann U.** Определение местонахождения шва и слежение за швом с помощью тактильных датчиков, с. 150–157.**Butthoff H., Engels D.** Точность определения точки приложения электрода при сварке ВИГ, с. 158, 160–161.**Dilthey U., Gollnick J., Paul C.** Расширение области применения датчика в виде дуги, с. 164–166, 168.**Dilthey U., Wilms G.** Предпосылки для применения сенсоров в виде дуги при сварке алюминия, с. 172, 174–176.**Herrich J., Rippl P.** Гибридный способ — сварка лазерным лучом и плавящимся электродом в защитных газах, с. 178–182.

(Австрия), 2002. — № 3 (нем. яз.)

**Himmelbauer K.** Сварка в защитных газах плоской электродной проволокой, с. 34–35.**Wanschen W.** Резка лазерным лучом. Ч. 3, с. 36–40.**Hinneberg D.** Надежная сварка MAG стыковых и угловых швов сверху вниз в судостроении, с. 41–42.**Легкие** и твердые алюминиевые сплавы для моторостроения, с. 43.**Karaaslan A., Sonmez N., Yumurtaci S.** Свариваемость нелегированной строительной стали лазерным лучом, с. 44–47.

(Австрия), 2002. — № 4 (нем. яз.)

**Диодный** лазер: экологичный, небольшой, экономичный, с. 52–53.**Zimmerl E.** 9-е годичное собрание Общества неразрушающего контроля в Граце, с. 54–55.**Bosch L., Neges J.** Применение методов неразрушающего контроля в автомобильной промышленности, с. 56–58.



**Huppertz P. H.** Обмен опытом специалистов в Мюнхене в феврале 2002 г.: Сварка в аппаростроении и сосудостроении, с. 58–59.

**Двойной** выигрыш за счет нового исходного материала, с. 60.

**Новая** переносная камера для роботизированной сварки, с. 62.

(Австрия), 2002. — № 5 (нем. яз.)

**Уровень** сертификации в Австрии, с. 66–68.

**Иновации** в производстве, с. 69.

**Первые** в мире инженеры — специалисты по склеиванию, аттестованные согласно директиве Германского общества сварочной техники и Европейской федерации сварки, с. 70.

**Конференция** специалистов трех стран (Австрии, Швейцарии и Германии) по коррозии в 2002 г., с. 72.

**Цифровой** ультразвуковой прибор с аналоговым качеством цветного экрана, с. 74.

**Сварка** нового образца — сварочный аппарат с интеллектом, с. 76.

**Lehner H.** Практическое исполнение аттестации способа и рабочих образцов, с. 77–78.

**НАУТИЛУС** контролирует трубопроводы на дне озера, с. 78–79.

**Экономичная** автогенная резка ацетиленом, с. 79.



(Великобритания), 2002.

— № 118 (англ. яз.)

**Thomas W., Staines D., Nicholas D., Norris I.** Новые разработки в области сварки трением с перемешиванием, с. 3.

**Knight A.** Стыковая сварка плавлением пластмасс, с. 4–5.



(США), 2002. — Vol. 81,  
№ 2 (англ. яз.)

**Перспективный** проект строительства необычного стартового стола для запуска новых ракет «Дельта» IV, с. 30–33.

**Johnsen M. R.** Сварка ускоряет изготовление пожарных машин для Нью-Йорка, с. 34–37.

**Snyder S. T.** Новая программа сертификации производителей, с. 38–41.

**Yamamoto D.** Скульптура, выполненная с помощью сварки, с. 42–44.

**Kohn G., Greenberg Y., Makover I., Munitz A.** Лазерная сварка трением с перемешиванием, с. 46–48.

**Ramasamy S., Gould J., Workman D.** Исследование влияния полярности на приварку шпилек методом планирования эксперимента, с. 19–26.

**Park Y. D., Maroef I. S., Landau A., Olson D. L.** Осаточный аустенит в качестве водородной ловушки в стальных сварных соединениях, с. 27–35.

(США), 2002. — Vol. 81,  
№ 3 (англ. яз.)

**Brace M., Brook J.** Рекомендации по выбору наилучшего метода сварки листового материала, с. 23–26.

**Johnsen M. R.** Нетрадиционная профессия — сварщик-женищина, с. 28–30.

**Funderburk S., Krebs D., Lee K.** Новое руководство по сварке порошковой проволокой, выполняемой в сейсмических областях, с. 32–36.

**Draugelates U., Bouaifi B. et al.** Плазменно-дуговая пайка: техника соединений листового материала, выполненных при низкой затрате энергии, с. 38–42.

**Li M. Y., Kannatey-Asibu E.** Моделирование методом Монте-Карло микроструктуры зоны термического влияния листового никеля, сваренного лазерным лучом, с. 37–44.

**Gunaraj V., Murugan N.** Прогнозирование характеристики зоны термического влияния при дуговой сварке под флюсом труб из конструкционной стали, с. 45–53.

## НОВЫЙ ЖУРНАЛ



Вышел в свет первый номер ежеквартального журнала для профессионалов «Инженерные сети из полимерных материалов».

Учредитель журнала Ассоциация производителей и строителей полимерных трубопроводов.

В своем обращении к создателям и читателям журнала академик Б. Е. Патон, в частности отметил, что журнал призван распространять передовой производственный опыт трубопроводного строительства, содействовать созданию новых видов материалов, оборудования и сварочных технологий для сооружения инженерных сетей из полимеров.

### Адрес редакции:

03680, г. Киев, ул. Боженко, 11, корп. 8, комн. 535  
для писем: Киев-150, а/я 136  
тел. (044) 227-60-79  
E-mail: polyjournal@ukr.net