

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

МЕЖДУНАРОДНЫЙ
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

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

УЧРЕДИТЕЛИ:

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

ИЗДАТЕЛЬ:

Международная ассоциация
«Сварка»

Адрес редакции:

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

Редакторы:

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

Свидетельство о государственной
регистрации КВ 4788
от 09.01.2001.

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

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

<i>Белоус В. Ю., Ахонин С. В.</i> Влияние параметров управляющего магнитного поля на формирование сварных швов при аргонодуговой сварке титановых сплавов в узкий зазор	3
<i>Цыбульский Г. А.</i> Компенсация воздействия внешних возмущений на режим дуговой сварки плавящимся электродом	7
<i>Гиридхаран П. К., Муруган Н.</i> Связь параметров процесса импульсной дуговой сварки с геометрией наплавленного валика на сталь AISI 304L	11
<i>Лебедев В. А.</i> Зависимость между скоростями импульсной подачи проволоки и ее плавления при сварке с короткими замыканиями	19
<i>Гедрович А. И., Ткаченко А. Н., Ткаченко С. А., Зельниченко А. Т., Алексеенко И. И., Бондаренко В. Л.</i> Особенности формирования структуры и свойств зоны сплавления стали 10X13Г18Д	23
<i>Лабур Т. М., Ищенко А. Я., Таранова Т. Г., Костин В. А., Григоренко Г. М., Чайка А. А.</i> Влияние теплофизических условий сварки на сопротивление разрушению металла околошовной зоны в соединениях алюминиевого сплава В96с	28

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

<i>Махненко В. И., Махненко О. В., Зинченко О. Я.</i> Исследование работоспособности сварных соединений при испытаниях на герметичность парогенераторов ПГВ-1000М	34
<i>Неклюдов И. М., Борц Б. В., Ванжа А. Ф., Лопата А. Т., Рыбальченко Н. Д., Сытин В. И., Шевченко С. В.</i> Повышение качества неразъемных соединений — путь к продлению ресурса теплообменников сборок	41
<i>Блашук В. Е.</i> Сварка титана и его сплавов неплавящимся электродом (Обзор)	46
<i>Борисов Ю. С., Панько М. Т., Рупчев В. Л.</i> Способы производства порошков с квазикристаллической составляющей для газотермического нанесения покрытий (Обзор)	53

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

<i>Жерносеков А. М., Кислицын В. М.</i> Повышение эффективности газогенераторов водородно-кислородной смеси	57
Новости	59
Патенты в области сварочного производства	61
По зарубежным журналам	64

ХРОНИКА

Наши поздравления (А. А. Аммосов, Е. А. Великоиваненко)	67
К 75-летию со дня рождения В. Ф. Лапчинского	68

ИНФОРМАЦИЯ	69
------------------	----

Avtomaticheskaya Svarka

(Automatic Welding)

№ 4 (648)

April 2007

Published since 1948

WELDING – CUTTING – SURFACING – BRAZING – COATING

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B.E.PATON

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

THE INTERNATIONAL
EDITORIAL COUNCIL:

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

FOUNDERS:

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

PUBLISHER:

International Association «Welding»

Address of Editorial Board:

11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine

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

Fax: (38044) 528 04 86

E-mail: journal@paton.kiev.ua

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

Editors:

E. N. Kazarova, T. V. Yushkina

Electron galley:

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

A.I.Sulima, I. R. Naumova,

I. V. Petushkov

State Registration Certificate

KV 4788 of 09.01.2001

All rights reserved.

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

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

CONTENTS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

<i>Belous V. Yu., Akhonin S. V.</i> Effect of parameters of controlling magnetic field on formation of welds in argon arc narrow-gap welding of titanium alloys	3
<i>Tsybulkin G. A.</i> Compensation of effect of external disturbances on consumable electrode arc welding conditions	7
<i>Giridharan P. K., Murugan N.</i> A study of pulsed GTA welding process parameters on weld bead geometry of AISI 304L stainless steel welds	11
<i>Lebedev V. A.</i> Dependence between a pulsed wire feeding and its melting speed in short-circuit welding	19
<i>Gedrovich A. I., Tkachenko A. N., Tkachenko S. A., Zelnichenko A. T., Alekseenko I. I., Bondarenko V. L.</i> Peculiarities of formation of structure and properties of fusion zone of steel 10Kh13G10D	23
<i>Labur T. M., Ishchenko A. Ya., Taranova T. G., Kostin V. A., Grigorenko G. M., Chaika A. A.</i> Effect of thermophysical conditions of welding on fracture resistance of HAZ metal of joints of aluminium alloy V96tsc	28

INDUSTRIAL

<i>Makhnenko V. I., Makhnenko O. V., Zinchenko O. Ya.</i> Investigation of serviceability of welded joints in leak tests of steam generators PGV-1000M	34
<i>Neklyudov I. M., Borts B. V., Vanzha A. F., Lopata A. T., Rybalchenko N. D., Sytin V. I., Shevchenko S. V.</i> Improvement of quality of permanent joints is the way to extension of life of heat evolving sub-assemblies	41
<i>Blashchuk V. E.</i> Welding of titanium and its alloys with a non-consumable electrode (Review)	46
<i>Borisov Yu. S., Panko M. T., Rupchev V. L.</i> Methods of production of powders with a quasi-crystalline constituent for thermal spraying of coatings (Review)	53

BRIEF INFORMATION

<i>Zhernosekov A. M., Kislitsin V. M.</i> Improvement of effectiveness of gas generators of hydrogen-oxygen mixture	57
News	59
Patents in the field of welding	61
Review of foreign journals	64

NEWS

Our congratulations (A. A. Ammosov, V. E. Velikoivanenko)	67
Towards the 75-birthday anniversary of V. F. Lapchinsky	68

INFORMATION	69
-------------------	----

Journal «Avtomaticheskaya Svarka» is published in English under the title «The Paton Welding Journal». Concerning publication of articles, subscription and advertising, please, contact the editorial board.



УДК 621.791.75

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЯЮЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В УЗКИЙ ЗАЗОР

В. Ю. БЕЛОУС, инж., С. В. АХОНИН, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Отмечена эффективность применения аргонодуговой сварки неплавящимся электродом в узкий зазор титановых сплавов толщиной более 20 мм. Показано, что для обеспечения надежного сплавления в соединениях, полученных сваркой с использованием поперечного переменного магнитного поля, значение магнитной индукции в зоне дуги должно составлять 8...9 мТл. Минимальное проплавление боковых стенок достигается при частоте поля 10 Гц.

Ключевые слова: аргонодуговая сварка, узкощелевая разделка, титановый сплав, вольфрамовый электрод, проплавление, боковая стенка, магнитная индукция, частота поля

Для соединения титановых сплавов толщиной 20 мм и более эффективна аргонодуговая сварка неплавящимся электродом в узкий зазор. Основной проблемой, возникающей при этом, является обеспечение надежного сплавления вертикальных стенок узкого зазора с наплавляемым валиком, а также валиков между собой. Для ее решения существуют различные технологические приемы: использование режимов сварки с повышенной погонной энергией; поочередная раскладка валиков [1]; механические колебания электрода от кромки к кромке [2]; наложение поперечного магнитного поля [3]. Однако, поскольку процесс сварки с повышенной погонной энергией характеризуется малой производительностью, сварные швы, выполненные на таком режиме, имеют зону термического влияния (ЗТВ) большой ширины. Поскольку титан и сплавы на его основе относятся к немагнитным материалам, то наиболее эффективным способом обеспечения надежности и равномерности расплавления боковых стенок зазора является управление отклонением сварочной дуги посредством наложения внешнего управляющего поперечного переменного магнитного поля (далее — магнитного поля).

В работе [3] описана сварка титана в узкий зазор вольфрамовым электродом с управляющим магнитным полем. При указанном способе сварки магнитное поле создается электромагнитом, имеющим магнитопровод специальной формы, который опущен в разделку (рис. 1), при этом силовые линии поперечного магнитного поля направлены параллельно оси сварного шва.

В настоящее время в литературе отсутствуют данные о влиянии параметров управляющего магнитного поля на формирование сварных швов при сварке в узкий зазор. При сварке с управляющим магнитным полем важнейшими его параметрами, влияющими на отклонение сварочной дуги, являются магнитная индукция B_x в зоне дуги (составляющая магнитной индукции вдоль оси x) и частота W переменного магнитного поля.

Цель настоящей работы — исследование закономерностей изменения формы сварных швов в зависимости от параметров магнитного поля, что позволит из их числа выбрать оптимальные, при которых формируется качественный наплавленный валик.

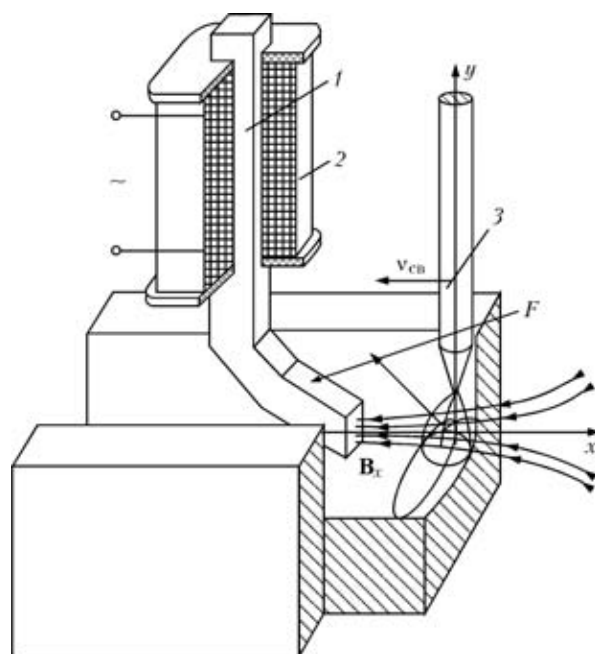


Рис. 1. Схема сварки в узкий зазор вольфрамовым электродом: 1 — сердечник электромагнита; 2 — катушка; 3 — электрод; F — сила, отклоняющая столб дуги; $v_{св}$ — скорость сварки

© В. Ю. Белоус, С. В. Ахонин, 2007

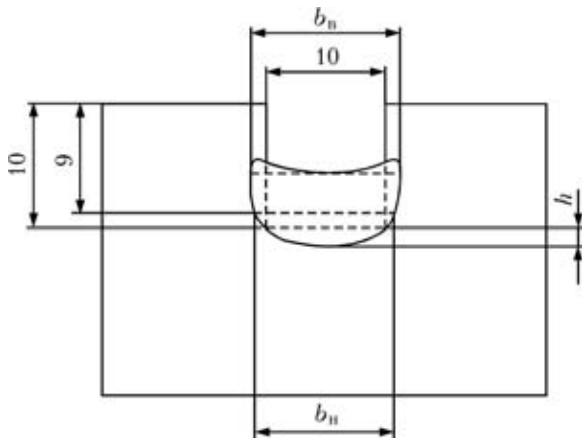


Рис. 2. Схема наплавки валика в узкий зазор: h — глубина проплавления основного металла; $b_в$, $b_н$ — ширина валика соответственно в верхней и нижней части

С этой целью проведен ряд экспериментов по наплавке, имитирующих выполнение заполняющих проходов с последующим измерением размеров полученных сварных швов (рис. 2). Эксперименты проводили в два этапа: на первом — исследовали влияние магнитной индукции на форму поперечного сечения сварного шва при постоянной частоте магнитного поля, а на втором — влияние частоты переменного магнитного поля на форму поперечного сечения сварного шва при постоянном значении магнитной индукции.

Предварительные эксперименты показали, что сварные швы, выполненные без отклонения сварочной дуги, имеют большую глубину проплавления дна разделки и малую ширину шва в его нижней части (рис. 3, *a*). В этом случае возможно появление в углах разделки непроваров. Определено также, что значительное проплавление бо-

ковых стенок разделки приводит к чрезмерной ширине шва и ЗТВ, при этом могут возникать такие дефекты, как несплавления (рис. 3, *б*).

В связи с этим в качестве оптимальной формы наплавленного валика при сварке в узкий зазор принята такая, при которой глубина проплавления поверхности предыдущего валика минимальна, а ширина шва в верхней части $b_в$ равна ширине в нижней его части $b_н$, т. е. глубина проплавления боковых стенок по высоте одинакова. В этом случае ЗТВ имеет малую протяженность, а непровары в шве не возникают.

Сварку выполняли на постоянном режиме. Валик высотой 5 мм наплавливали на токе 400 А, что соответствует нижней границе диапазона сварочного тока и позволяет получить сварное соединение, имеющее ЗТВ малой протяженности. Напряжение на дуге составляло $U_д = 12$ В, скорость сварки $v_{св} = 8$ м/ч.

Управляющее магнитное поле создавал электромагнит с устройством ОИ-119, разработанным в ИЭС им. Е. О. Патона, генерирующим импульсы переменного тока, близкие по форме к прямоугольным (рис. 4). В ходе экспериментов частоту переменного магнитного поля устанавливали в пределах 2,5...80,0 Гц, а значение магнитной индукции переменного магнитного поля в зоне дуги изменяли от 2 до 12 мТл. Образцы были выполнены из технического титана марки ВТ1-0, присадочная проволока — титановый сплав ОТ4-1. Выбор последнего обусловлен тем, что он содержит в качестве легирующего элемента алюминий, что позволяет методом микрорентгеноспектрального анализа точно определить ширину шва и протяженность зоны сплавления [3]. Измерение ши-

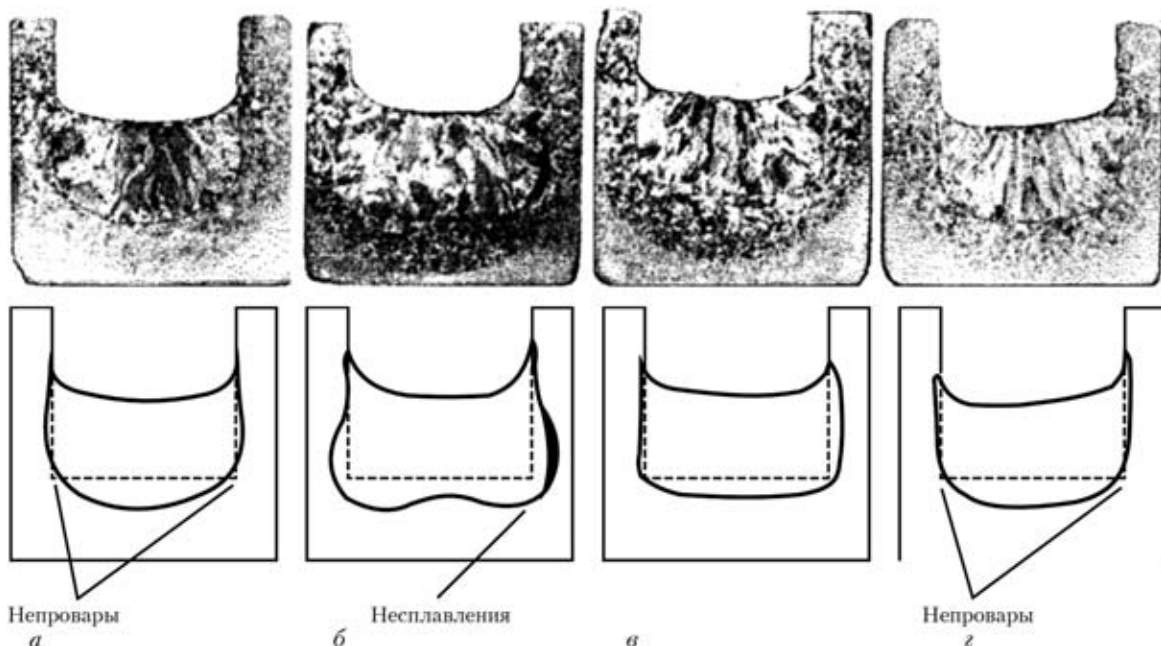


Рис. 3. Макрошлифы валиков, полученных сваркой в узкий зазор (вверху), и схемы форм проваров (внизу): *a* — валик, полученный без управляющего магнитного поля; *б* — $b_в < b_н$; *в* — $b_в = b_н$; *г* — $b_в > b_н$

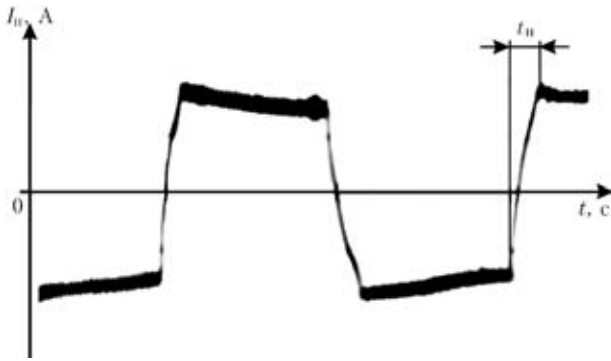


Рис. 4. Осциллограмма импульсов тока намагничивания, протекающего через катушку электромагнита: I_n — ток намагничивания; t_n — время нарастания импульса тока

рины валика b и глубины проплавления h основного металла выполняли на поперечных шлифах, вырезанных из сварных швов.

Результаты экспериментов показали, что при увеличении магнитной индукции в зоне дуги возрастает степень проплавления боковых стенок узкой разделки в нижней части, т. е. b_n увеличивается (рис. 5). При $B_x = 8$ мТл ширина шва в его верхней и нижней части одинакова (рис. 5), при $B_x < 8$ мТл ширина шва в верхней его части больше, чем в нижней. Макрошлифы наплавов, полученные при $B_x < 8$ мТл, имеют в углах разделки непровары. При $B_x = 11...12$ мТл поперечное сечение наплавленного валика приобретает форму, показанную на рис. 3, б. С увеличением магнитной индукции глубина проплавления дна разделки уменьшается (рис. 6).

Таким образом, исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что при $B_x = 8...9$ мТл достигается оптимальное формирование наплавленного валика, т. е. ширина шва в его верхней и нижней части равны.

Частота переменного магнитного поля также оказывает влияние на форму наплавляемого валика. Результаты экспериментов показали, что наибольшая глубина проплавления боковых стенок разделки достигается при частоте магнитного по-

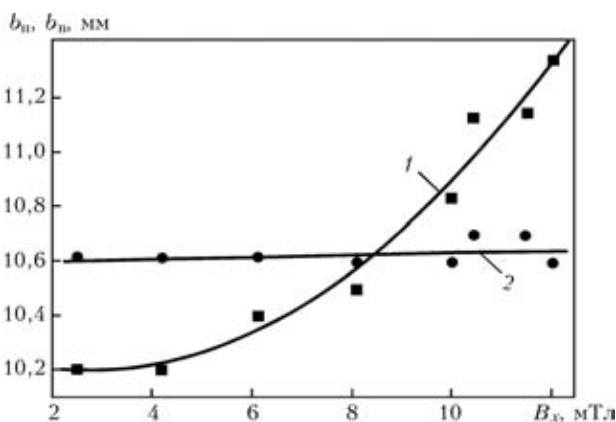


Рис. 5. Зависимость ширины шва, выполненного сваркой в узкий зазор, от магнитной индукции переменного магнитного поля: 1, 2 — ширина шва соответственно внизу иверху

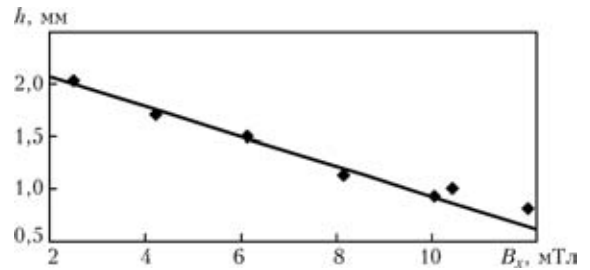


Рис. 6. Зависимость глубины проплавления h дна узкой разделки от магнитной индукции B_x переменного магнитного поля

ля 2,5 Гц (рис. 7), а именно, если дуга находится у боковой стенки продолжительное время. В этом случае глубина проплавления боковых стенок разделки зазора в верхней части шва меньше, чем в нижней. Поперечное сечение наплавленных валиков, выполненных при частоте магнитного поля $W = 2,5...4,0$ Гц, в верхней части шва имеет меньшую ширину, чем в нижней (см. рис. 3, б). Наименьшая глубина проплавления боковых стенок разделки достигается при $W = 80$ Гц. Форма поперечного сечения наплавленного валика при $W = 50...80$ Гц сходна с формой валика, полученного без воздействия магнитного поля. Макрошлифы наплавов, выполненных при $W = 20...80$ Гц, имеют непровары в углах разделки.

Зависимость глубины проплавления дна разделки от частоты переменного магнитного поля минимальна при $W = 10...20$ Гц (рис. 8). Перегиб кривой связан с тем, что наибольшая глубина проплавления дна разделки при $W = 2,5...10,0$ Гц имеет место у боковых стенок, а при $W = 20...80$ Гц — в центре шва. Глубина проплавления дна разделки при частоте магнитного поля $W = 10...20$ Гц минимальна и составляет около 1 мм; при этом значения этой величины в центре шва и у боковых стенок одинаковы. Кроме того, поперечное сечение валиков, выполненных при $W = 4...10$ Гц, имеет одинаковую ширину в их верхней и нижней части. Таким образом, при $W = 10$ Гц формируется валик, у которого глубина проплавления дна разделки минимальна, а ширина в его верхней и нижней части одинакова.

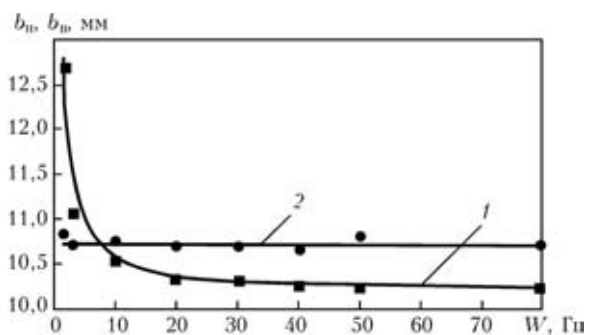


Рис. 7. Зависимость ширины шва, выполненного сваркой в узкий зазор, от частоты W переменного магнитного поля: 1, 2 — см. рис. 5

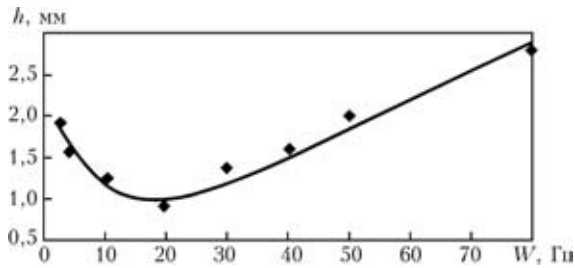


Рис. 8. Изменение глубины проплавления дна узкой разделки от частоты переменного магнитного поля

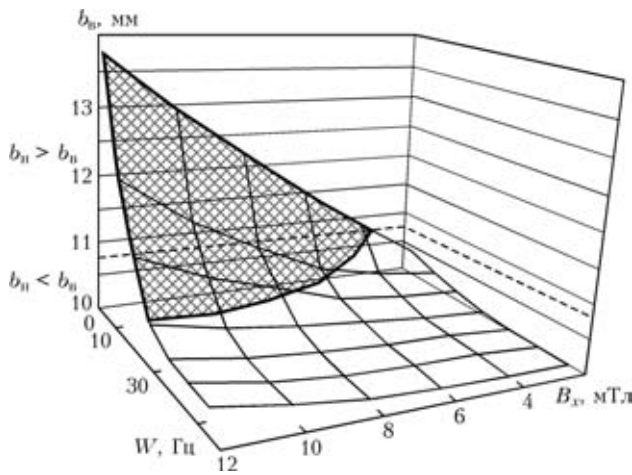


Рис. 9. Влияние индукции B_x и частоты W переменного магнитного поля на ширину валика в нижней части b_n , заштрихованная область — $b_n > b_n$

Более глубокое проплавление боковых стенок разделки при повышении магнитной индукции связано с тем, что угол поворота сварочной дуги при этом возрастает [4], в результате большая часть анодного пятна перемещается к боковой стенке, где соответственно усиливается тепловложение и увеличивается глубина проплавления.

Уменьшение глубины проплавления боковых стенок разделки при повышении частоты магнитного поля связано с увеличением количества переходов дуги в единицу времени из одного

крайнего положения в другое. Поскольку время нарастания импульса тока намагничивания t_H (см. рис. 4) составляет 6 мс и при изменении частоты магнитного поля это значение постоянное (при использовании устройства управления ОИ-119), то в течение этого времени дуга находится в промежуточном положении и дно узкой разделки расплавляется. В связи с увеличением частоты магнитного поля при неизменной магнитной индукции глубина проплавления боковых стенок уменьшается (рис. 9). Чтобы оно происходило на одинаковой глубине при повышении частоты магнитного поля, следует сварочную дугу поворачивать на больший угол, а для этого необходимо увеличивать магнитную индукцию. Если $W = 20$ Гц, то равномерное проплавление боковых стенок достигается при $B_x = 12...13$ мТл.

Выводы

1. Для формирования наплавляемого валика оптимальной формы при сварке в узкий зазор, а также с целью исключения образования несплавленных при наплавке валика высотой 5...6 мм в разделку шириной 8...10 мм значение магнитной индукции управляющего переменного магнитного поля в зоне дуги должно составлять 8...9 мТл.

2. Минимальное проплавление поверхности предыдущего слоя и равномерное по высоте проплавление боковых стенок узкой разделки происходит при частоте переменного магнитного поля 10 Гц.

1. Кацуёси Хори, Мицуаки Ханэда. Дуговая сварка в узкий зазор // Журн. Япон. свароч. об-ва. — 1999. — № 3. — С. 55–56.
2. Гринин В. С., Штрикман М. М. Высокопроизводительная автоматическая сварка в узкощелевую разделку // Свароч. пр-во. — 1982. — № 7. — С. 21–23.
3. Paton V. E., Zamkov V. N., Prilutsky V. P. Narrow-groove welding proves its worth on thick titanium // Welding J. — 1996. — № 5. — P. 37–41.
4. Гаген Ю. Г., Таран В. Сварка магнитоуправляемой дугой. — М.: Машиностроение, 1970. — 160 с.

The effectiveness of application of narrow-gap nonconsumable-electrode argon-arc welding of titanium alloys of ? 20 mm thickness is noted. It is shown that in order to provide a reliable fusion in the joints when using a transverse variable magnetic field the value of magnetic inductance in the arc zone should be equal to 8 Ц 9 mT. Minimum penetration of the side walls is achieved at the field frequency of 10 Hz.

Поступила в редакцию 23.02.2006,
в окончательном варианте 21.03.2006



КОМПЕНСАЦИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА РЕЖИМ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Г. А. ЦЫБУЛЬКИН, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассматривается один из подходов к снижению влияния внешних возмущений на параметры режима дуговой сварки, основанный на использовании принципа поглощения. Изложена процедура структурного синтеза компенсирующей обратной связи. Приведены результаты математического моделирования.

Ключевые слова: дуговая сварка, стабилизация режима, принцип поглощения, компенсация возмущений, структурный синтез, внутренние модели

Проблема стабилизации режима автоматической дуговой сварки плавящимся электродом давно обсуждается в литературе [1–5]. Эта проблема, как известно, связана с существенным влиянием на процесс дуговой сварки различного рода неконтролируемых возмущений, приводящих в итоге к снижению качества сварного соединения. Основная трудность при построении систем стабилизации состоит в том, что сварочный контур с плавящимся электродом как объект автоматического управления сам по себе уже представляет систему с естественной обратной связью, обеспечивающей саморегулирование длины дуги [6]. Поэтому простое введение в сварочный контур дополнительных обратных связей для стабилизации режима сварки не всегда приводит к желаемому эффекту.

Между тем, существует и иная возможность устранения влияния возмущений, основанная на использовании так называемого принципа поглощения [7], в основе которого лежит синтез внутренней модели внешнего возмущения с введением компенсирующей связи. Несмотря на возросший в последнее время интерес к системам этого класса [7–11], указанный принцип пока еще не получил должного развития в системах управления сварочными процессами.

В настоящей работе рассматривается задача синтеза структуры компенсирующего устройства (КУ), обеспечивающего в некоторых случаях снижение влияния внешних воздействий на параметры режима дуговой сварки.

Рассмотрим структурную схему сварочного контура (рис. 1), составленную на основании уравнений [12]:

$$\begin{aligned} (LD + S)i &= u_* - u_s; \quad u_s - u_a = Ri; \quad u_a = u_0 + El; \\ l &= H - h; \quad h = \frac{1}{D}(v_e - v_m); \quad v_m = Mi, \end{aligned} \quad (1)$$

где L — индуктивность источника сварочного тока; R — суммарное сопротивление подводящих проводов, вылета электрода h и скользящего контакта в мундштуке горелки; u_s — напряжение на выходных клеммах источника сварочного тока; u_* — напряжение холостого хода; u_a — напряжение на дуге; u_0 — сумма приэлектродных падений напряжений; i — ток сварки; l — длина дугового промежутка; $E \equiv \partial u_a / \partial l$ — напряженность электрического поля в столбе дуги; $S \equiv \partial u_s / \partial i$ — крутизна вольт-амперной характеристики источника сварочного тока при номинальном значении тока $i_{ном}$; H — расстояние между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны; v_e — скорость движения (скорость подачи) плавящегося электрода относительно сопла горелки; v_m — скорость плавления электрода; $M \equiv \partial v_m / \partial i$ — крутизна характеристики плавления электрода при номинальных значениях сварочного тока $i_{ном}$ и вылета электрода $h_{ном}$; $D = d/dt$ — оператор дифференцирования; t — время.

Из рис. 1 видно, что внешние возмущения, действующие на напряжение u_* , скорость v_e и расстояние H , могут привести к изменению номинальных значений сварочного тока $i_{ном}$ и напряжения на дуге $u_{a,ном}$. Рассмотрим для определенности случай, когда возмущение номинального режима дуговой сварки вызвано кратковременным изменением H . При этом прежде всего произойдет изменение (возмущение) напряжения на дуге $u_a(t)$. Представим $u_a(t)$ в виде суммы

$$u_a(t) = u_{a,ном} + \xi(t), \quad (2)$$

где $\xi(t)$ — результирующее возмущение.

Ясно, что для компенсации возмущения $\xi(t)$ необходимо его измерить. Но поскольку непосредственное измерение $u_a(t)$ практически невозможно, то попытаемся оценить $\xi(t)$ косвенным путем, введя в структуру системы двухвходовую внутреннюю модель внешнего возмущения. Идея косвенной оценки заключается в следующем. Ес-

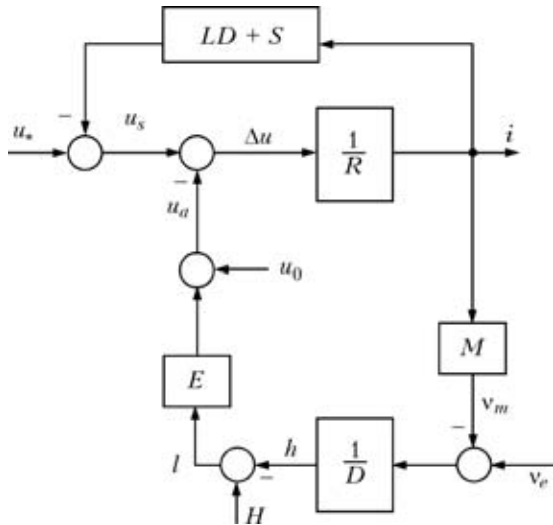


Рис. 1. Структурная схема сварочного контура (здесь и на рис. 2, 3 см. обозначения в тексте)

ли две координаты в цепи из детектирующих звеньев выбраны так, что элемент, на который воздействует возмущение $\xi(t)$, находится между ними, то разность выбранных координат будет функцией этого возмущения. При определенном подборе операторов внутренней модели некоторая переменная $\delta(t)$ будет пропорциональна или равна возмущению $\xi(t)$. Следует заметить, что идея косвенного измерения возмущений впервые была высказана, по-видимому, А. Г. Ивахненко [13] и получила дальнейшее развитие в работах [14–17].

Структура КУ, включающая двухвходовую внутреннюю модель внешнего возмущения и компенсирующую связь, представлена на рис. 2, где для удобства рассмотрения показан лишь тот участок сварочного контура, элементы которого используются в дальнейших расчетах. На основании внутренней модели (иногда ее называют дифференциальной вилкой [15, 17]) можно записать

$$y = (1 - W_1 W_0) u_s - W_1 W_0 u_a, \quad (3)$$

где через W_0 обозначен оператор

$$W_0 = 1/R, \quad (4)$$

а через W_1 — неизвестный пока оператор.

Если измерительные связи выполнены так, что

$$W_1 W_0 \equiv 1, \quad (5)$$

то из выражения (3) следует тождество

$$y \equiv u_a, \quad (6)$$

которое означает, что в каждый момент времени t сигнал $y(t)$ численно равен напряжению на дуге $u_a(t)$. Это является важным, поскольку тогда, согласно структурной схеме, представленной на рис. 2, и с учетом соотношений (2) и (6) получим

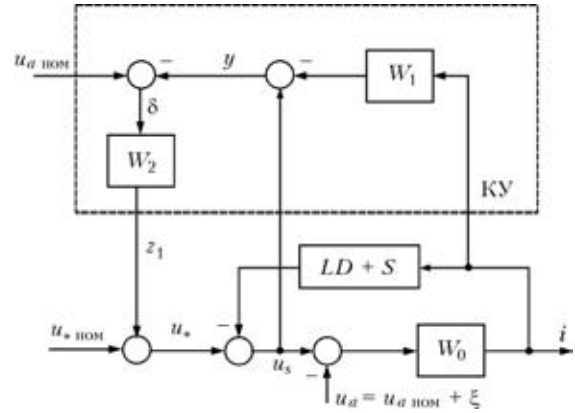


Рис. 2. Структурная схема КУ с компенсирующим воздействием на напряжение холостого хода

равенство $\delta = u_{a \text{ ном}} - y = u_{a \text{ ном}} - u_{a \text{ ном}} - \xi = -\xi$. Отсюда следует, что сигнал $\delta(t)$, создаваемый измерительными связями, не зависит ни от тока сварки i , ни от напряжения на дуге $u_a(t)$, а зависит лишь от возмущения $\xi(t)$.

Теперь воспользуемся принципом поглощения [7], в силу которого инвариантность напряжения u_a относительно возмущения $\xi(t)$ может быть обеспечена подавлением его компенсирующим воздействием $z_1(t)$. Поскольку в данной схеме (рис. 2) компенсирующее воздействие направлено по цепи управления напряжением u_* , то указанная инвариантность означает, что $z_1 \equiv W_2 \delta \equiv \xi$. Следовательно, для компенсации $\xi(t)$ необходимо обеспечить выполнение тождества $W_2 \equiv 1$.

На практике закон управления $u_* = u_*(\delta)$, осуществляющий текущую компенсацию возмущения, целесообразно строить исходя из условия астатизма, т. е. в интегральной форме

$$u_* = u_{* \text{ ном}} + z_1; \quad z_1 = K_1 \int_0^t \delta(t) dt,$$

где $u_{* \text{ ном}}$ — номинальное значение напряжения холостого хода; K_1 — положительный коэффициент.

При этом оператор W_2 будет иметь вид

$$W_2 = \frac{K_1}{D}. \quad (7)$$

Итак, для компенсации (поглощения) возмущения ξ необходимо обеспечить согласно (4), (5) и (7) выполнение двух условий:

$$W_1 \equiv \frac{1}{W_0} = R; \quad W_2 = \frac{K_1}{D}. \quad (8)$$

Выбором операторов W_1 и W_2 синтез модели поглощения, включающей двухвходовую модель внешнего воздействия и компенсирующую обрат-

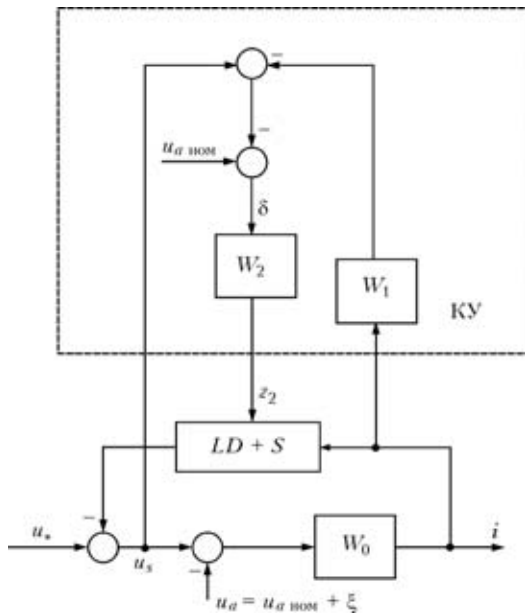


Рис. 3. Структурная схема КУ с компенсирующим воздействием на крутизну вольт-амперной характеристики источника сварочного тока

ную связь, завершается. В результате получаем КУ с весьма ценным свойством — оно создает сигнал $z_1(t)$, существенно подавляющий внешнее возмущение, поступающее на тот участок цепи, который охватывается двухвходовой моделью.

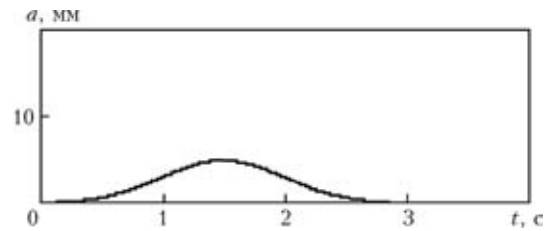


Рис. 4. График функции $a(t)$

Тем самым обеспечивается стабилизация напряжения на дуге на уровне заданного номинального значения $u_{a ном}$.

В тех случаях, когда важнее обеспечивать независимость сварочного тока i от возмущения $\xi(t)$, компенсирующую обратную связь следует завести на параметрический вход звена с передаточной функцией $(LD + S)$, как показано на рис. 3. Закон управления, осуществляющий текущую компенсацию возмущения, в этом случае будем строить в виде

$$S = S_{ном} + z_2; \quad z_2 = K_2 \int_0^t \delta(t) dt,$$

где $S_{ном}$ — номинальное значение крутизны вольт-амперной характеристики источника сварочного тока, а $K_2 = const > 0$.

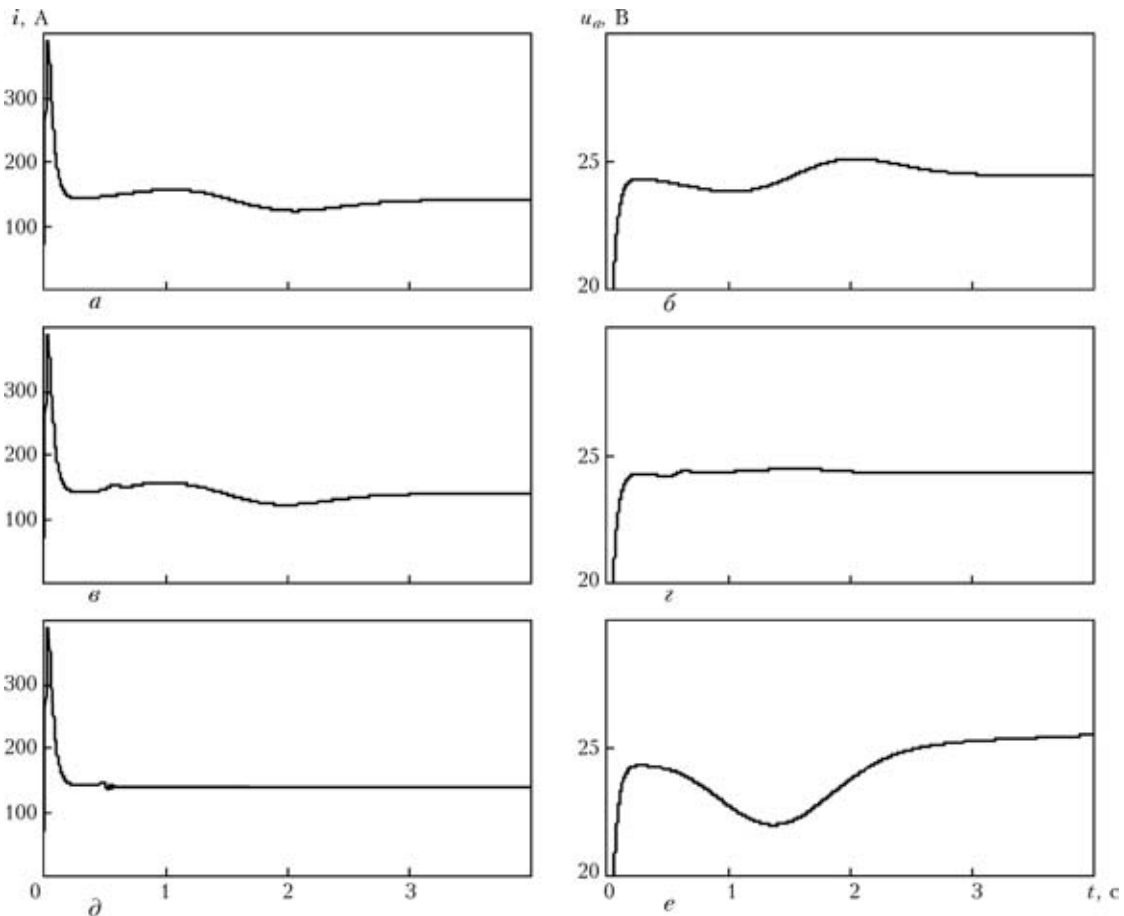


Рис. 5. Графики функций $i(t)$ (а, в, д) и $u_a(t)$ (б, з, е), построенные по результатам моделирования (а–е — см. в тексте)



Для проверки эффективности введения КУ в сварочный контур с помощью ЭВМ проводили моделирование динамики процессов, протекающих в контуре при дуговой сварке.

Взяты следующие параметры контура и режима сварки: $L = 4 \cdot 10^{-4}$ Гн; $R = 0,02$ Ом; $S = -0,02$ В/А; $u_* = 30$ В; $u_0 = 12$ В; $u_{a\text{ном}} = 24$ В; $v_e = 50$ мм/с; $H_{\text{ном}} = 17$ мм. Расчетные значения коэффициентов КУ K_1 и K_2 составили $K_1 = 50 \text{ с}^{-1}$ и $K_2 = 0,01 \text{ (А·с)}^{-1}$.

В качестве возмущения рассматривалось изменение расстояния $H(t)$, вызванное «прихваткой» на осевой линии свариваемых соединений. Закон изменения $H(t)$ задавался зависимостью $H(t) = [17 - a(t)]$ мм, где $a(t) = 5e^{-n(t-1,5)^2}$ мм, $n = 2c^{-2}$. График функции $a(t)$ показан на рис. 4.

Результаты моделирования представлены на рис. 5 в виде кривых $i(t)$ и $u_a(t)$ в контуре без (рис. 5, а, б) и с компенсирующей связью (рис. 5, в–е). При сравнении кривых можно увидеть, что в контуре без КУ возмущение по расстоянию приводит к изменению сварочного тока $i(t)$ и напряжения на дуге $u_a(t)$ (рис. 5, а, б). В контуре с КУ дело обстоит иначе. В том случае, когда компенсирующий сигнал $z_1(t)$ воздействует на напряжение холостого хода u_* (см. рис. 2), напряжение на дуге $u_a(t)$ становится независимым от возмущения и равным $u_{a\text{ном}}$ (рис. 5, в). При этом отклонение сварочного тока $i(t)$ от его номинального значения $i_{\text{ном}}$ остается практически не компенсированным (рис. 5, г). В случае, когда компенсирующий сигнал $z_2(t)$ воздействует на крутизну S вольт-амперной характеристики источника сварочного тока (см. рис. 3), инвариантным по отношению к возмущению становится ток сварки $i(t)$, а изменение напряжения на дуге $u_a(t)$ при этом даже несколько увеличивается по сравнению с аналогичными показателями в схеме без КУ.

Таким образом, результаты численного моделирования показали, что введение в систему управления процессом дуговой сварки с плавящимся электродом компенсирующих связей позволяет реализовать идею поглощения вредных воздействий. Однако стабилизировать при этом удается лишь один из основных параметров режима (или сварочный ток, или напряжение на дуге). Тем не менее, высокая эффективность введения компен-

сирующей связи дает основание ожидать, что с использованием принципа поглощения возмущений при разработке сварочного оборудования открывается еще один путь к улучшению качества сварных соединений.

1. Патон Б. Е. Некоторые задачи в области автоматического регулирования сварочных процессов // Автомат. сварка. — 1958. — № 4. — С. 3–9.
2. Гладков Э. А. Автоматизация сварочных процессов. — М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1976. — 176 с.
3. Автоматизация сварочных процессов / Под ред. В. К. Лебедева, В. П. Черныша. — Киев: Вищ. шк., 1986. — 296 с.
4. Лебедев А. В. Эффективность стабилизации среднего значения тока при полуавтоматической сварке // Автомат. сварка. — 1978. — № 10. — С. 37–41.
5. Стабилизация процесса импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом / Б. Е. Патон, П. П. Шейко, А. М. Жерносеков, Ю. О. Шимановский // Там же. — 2003. — № 8. — С. 3–6.
6. Патон Б. Е. Саморегулирование дуги при сварке плавящимся электродом // Там же. — 1952. — № 1 — С. 38–45.
7. Clarke D. W., Montadi C., Tuffs P. S. Generalized predictive control. Pt. 1: The basic algorithm // Automatica. — 1987. — 27, № 2. — P. 137–148.
8. Tomizuka M., Tsao T., Chew K. Analysis and synthesis of discrete-time repetitive controllers // ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control. — 1989. — 111, № 3. — P. 357–359.
9. Гудвин Г., Цыпкин Я. З. Робастные системы управления с внутренней моделью // Докл. АН Украины. — 1992. — 323, № 4. — С. 640–644.
10. Цыпкин Я. З. Синтез структуры стабилизирующих и инвариантных регуляторов // Там же. — 1996. — 347, № 5. — С. 607–609.
11. Цыбульский Г. А. О компенсации влияния неустойчивости режима сварки на оценку отклонения электрода от линии соединения свариваемых деталей // Автомат. сварка. — 1998. — № 4. — С. 50–52.
12. Цыбульский Г. А. К вопросу об устойчивости процесса дуговой сварки плавящимся электродом // Там же. — 2002. — № 5. — С. 17–19.
13. Ивахненко А. Г. Связь теории инвариантности с теорией дифференциальных регуляторов // Автоматика. — 1961. — № 1. — С. 3–25.
14. Менский Б. М. К вопросу о реализации принципа инвариантности // Изв. АН СССР. Энергетика и автоматика. — 1961. — № 5. — С. 80–86.
15. Кухтенко А. И. Проблема инвариантности в автоматике. — Киев: Гостехиздат, 1963. — 376 с.
16. Зайцев Г. Ф., Стеклов В. К. Автоматические системы с дифференциальными связями. — Киев: Техника, 1984. — 167 с.
17. Цыпкин Я. З. Стохастические дискретные системы с внутренними моделями // Пробл. управления и информатики. — 1996. — № 1/2. — С. 21–26.

The paper deals with one of the approaches to lowering the influence of external disturbances on the arc welding mode parameters, based on application of the absorption principle. The procedure of structural synthesis of compensating feedback is described. Results of mathematical simulation are given.

Поступила в редакцию 22.03.2006



СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИМПУЛЬСНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ С ГЕОМЕТРИЕЙ НАПЛАВЛЕННОГО ВАЛИКА НА СТАЛЬ AISI 304L

П. К. ГИРИДХАРАН, доц. (Технологический ин-т Амрита, Индия)
Н. МУРУГАН, проф. (Технологический ин-т Куамбатор, Индия)

Разработаны и описаны математические модели, устанавливающие связь между контролируемыми параметрами процесса импульсной сварки (ток и длительность импульса, скорость сварки) и параметрами валика шва (проплавление, ширина валика, коэффициент формы шва и площадь валика шва). Подтверждена адекватность моделей, основанных на регрессионном и дисперсионном анализе.

Ключевые слова: импульсная дуговая сварка, вольфрамовый электрод, нержавеющая тонколистовая сталь, параметры процесса, наплавленный валик, математические модели, планирование экспериментов, дисперсионный анализ, оптимизация

Импульсной дуговой сваркой можно соединять тонкие материалы, материалы средней толщины (например, листы нержавеющей стали), а также применять в тех случаях, когда управление металлургическими процессами в металле шва играет решающую роль. С целью обеспечения хорошего формирования металла шва выбор параметров процесса и технологии сварки должен быть конкретизирован.

При импульсной дуговой сварке благодаря пульсации сварочного тока от высокого до низкого уровня в течение коротких или длительных периодов времени обеспечивается в период импульса нагрев зоны шва до точки плавления, а в период протекания фонового тока расплавленная сварочная ванна охлаждается и затвердевает. Форма валика шва представляет собой серию накладывающихся друг на друга сварных точек, а степень их перекрытия зависит от частоты импульсов и скорости сварки [1]. Параметры процесса импульсной дуговой сварки приведены на рис. 1. Металл шва при сварке нержавеющей стали, полученный импульсным дуговым процессом, наряду с соответствующей геометрией, должен иметь высокие механические свойства и коррозионную стойкость [2]. Одной из основных проблем при сварке тонких листов аустенитной нержавеющей стали различных плавок являются колебания глубины их проплавления. В настоящее время для устранения колебаний глубины проплавления применяют дополнительную подачу присадочного материала, а также рекомендуется использование для автоматической сварки нержавеющей стали с содержанием серы не менее 0,008 % [1].

В работах [3–7] рассматривается выбор оптимального сочетания параметров процесса импульсной дуговой сварки для обеспечения удовлетворительного формирования валика при сварке тонколистовой нержавеющей стали. В работах содержатся сведения о планировании экспериментов с использованием трехуровневого полнофакторного плана для выполнения наплавки валика на лист (нержавеющая сталь 304L). Однако данных о корреляции параметров сварочного процесса и параметрами валика с использованием математических моделей для сварки тонколистовой нержавеющей стали нет [5]. Поэтому была предпринята попытка прогнозирования и оптимизации параметров валика шва с использованием математических моделей. Для разработки последних использовали статистически спланированный эксперимент, основанный на центральном композитном ротатабельном плане, с применением полнофакторного метода [8–10]. Для изучения основного и совместного воздействия параметров сварочного процесса на параметры валика шва использовали морфологию поверхности отклика. С целью уточнения параметров валика шва провели оптимизацию процесса сварки. Площадь валика шва рассматривали как объективную функцию (для минимального тепловложения), другие параметры

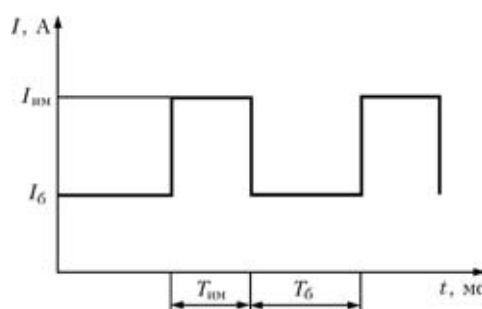


Рис. 1. Параметры процесса импульсной дуговой сварки вольфрамовым электродом в защитных газах: I_0 — базовый ток, А; $I_{им}$ — ток импульса, А; T_0 — длительность базового тока, мс; $T_{им}$ — длительность тока импульса, мс



(ширину, проплавление и коэффициент формы шва и его пределы) — как ограничения.

Методика проведения эксперимента. Листы аустенитной нержавеющей стали типа AISI 304L размером 100×50×3 мм сваривали встык способом ТИГ без разделки кромок. Химический состав листовой нержавеющей стали AISI 304L следующий, мас. %: 0,017 С; 10,1 Ni; 18,71 Cr; 0,22 Si; 1,64 Mn; 0,027 P; 0,047 S; 0,015 N; 69,224 Fe. Эксперименты проводили на итальянской установке для импульсной сварки ТИГ/МИГ Эссети-Унимакро 501С. Для защиты и обратной продувки использовали аргон промышленной чистоты. Фиксированные параметры процесса импульсной дуговой сварки вольфрамовым электродом в защитных газах следующие: частота импульсов 1 Гц; длина дуги 2 мм; среднее напряжение дуги 14 В; диаметр вольфрамового электрода 2,4 мм; угол заточки электрода 60°; расход газа (аргон): защитный 10 и продувка 5 л/мин. Использовали функцию автоматического управления напряжением, имеющуюся в оборудовании. Тепловложение рассчитывали по показаниям напряжения и тока на оборудовании.

Для проведения экспериментов и построения математических моделей независимо определяли регулируемые переменные: ток импульса $I_{им}$, длительность импульса тока $T_{им}$, скорость сварки S . В течение всего эксперимента соотношение базового и тока импульса поддерживалось равным 0,2.

С целью определения пределов каждой контролируемой переменной процесса была смоделирована опытная сварка для получения шва с полным проплавлением без каких-либо видимых дефектов. Учитывая несложность вычислений и более высокую интерпретируемость моделей, параметры преобразовали в закодированную форму для построения математических моделей и гра-

фиков, а также дальнейшего анализа результатов. Верхний предел множителя кодировался как +1,682, нижний как -1,682. Закодированное значение для промежуточных величин вычисляли с помощью следующей зависимости [10]:

$$X_i = (3,364 \cdot (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})) - 1,682, \quad (1)$$

где X — любое значение переменной от X_{\min} до X_{\max} ; X_i — требуемое закодированное значение X .

Выбранные переменные значения процесса импульсной дуговой сварки приведены в табл. 1. При этом использован центральный композитный ротатабельный пятиуровневый полнофакторный план экспериментов, состоящий из 20 серий [9, 10]. Эксперименты проводили произвольно во избежание появления систематической погрешности в методике.

Во время опытного прогона было обнаружено, что проплавление свариваемых пластин минимально между двумя импульсами, т. е. в месте максимального перекрытия валиков. Следовательно, при условии обеспечения проплавления в этом участке можно обеспечить полное проплавление по всей длине шва. Для измерения параметров валика шва на стыковом соединении нержавеющей стали выделен участок А-А с максимальным перекрытием (рис. 2).

Для определения макроструктуры сварные образцы шириной 10 мм вырезали и устанавливали на бейкелите, затем подвергали полировке и электролитическому травлению в 10%-м растворе щавелевой кислоты (рис. 3). Профиль валика шва, ширину валика W , глубину проплавления P и площадь валика шва BA определяли с помощью оптического профильного проектора и цифрового планиметра. Коэффициент формы шва вычисляли по измеренной ширине валика шва и глубине проплавления (AR — ширина валика/глубина проплавления).

Важным фактором, влияющим на геометрию валика, механические, металлургические и коррозионные свойства шва, является тепловложение, которое пропорционально напряжению и току и обратно пропорционально скорости сварки. В от-

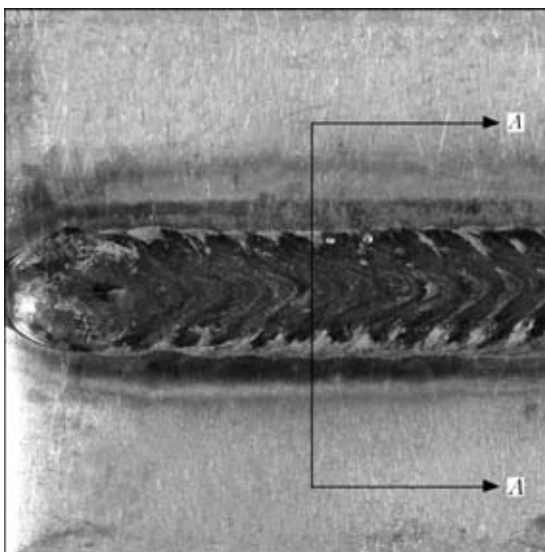


Рис. 2. Металл шва на пластине, выполненный импульсным дуговым процессом в защитных газах

Таблица 1. Переменные значения процесса импульсной дуговой сварки вольфрамовым электродом в защитных газах

Значения переменных процесса	$I_{им}, А$	$T_{им}, мс$	$S, см/мин$
-1,628	180	450	11
-1	188	490	12,6
0	200	550	15
1	212	610	17,4
1,628	220	650	19



Рис. 3. Макрошлиф сварного соединения с разрезом по А-А, показывающим профиль металла шва (X6)

личие от процесса дуговой сварки неплавящимся электродом в защитных газах на непрерывном токе, когда тепловложение вычисляется по непрерывному току, при импульсном процессе тепловложение вычисляется по среднему току I_{cp} по уравнению

$$I_{cp} = \frac{I_{им} T_{им} I_6 T_6}{T_{им} + T_6} \quad (2)$$

Тепловложение при импульсной дуговой сварке плавящимся электродом в защитных газах HI вычисляется по уравнению

$$HI = (I_{cp} U/S)\eta \quad (кДж/мм), \quad (3)$$

где U — среднее напряжение, В; η — производительность процесса сварки.

Для импульсной дуговой сварки принимали $\eta = 60 \%$. В ходе эксперимента установлено, что напряжение изменяется в пределах 13,4...14,6 В. Поэтому для расчетов тепловложения использовали среднее напряжение, равное 14 В. Значения ширины валика шва, глубины проплавления, площади валика шва и коэффициента формы шва и тепловложения для образцов, полученных импульсной дуговой сваркой, приведены в табл. 2.

Разработка математической модели. Для разработки математической модели и прогнозирования геометрии валика шва использовали регрессионный метод [11]. Функция поверхности отклика, отражающая любую геометрию валика, может быть выражена как $Y = f(I_{им}, T_{им}, S)$, а выбранная зависимость, являющаяся поверхностью отклика второго порядка, следующим образом [10]:

$$Y = b_0 + b_1 I_{им} + b_2 T_{им} + b_3 S + b_{11} I_{им}^2 + b_{22} T_{им}^2 + b_{33} S^2 + b_{12} I_{им} T_{им} + b_{13} I_{им} S + b_{23} T_{им} S, \quad (4)$$

где b_0, b_3 — соответственно постоянный член и коэффициенты линейных членов; b_{11}, b_{22}, b_{33} — коэффициенты квадратных членов второго порядка; b_{12}, b_{13}, b_{23} — коэффициенты взаимодействующих членов второго порядка.

Т а б л и ц а 2. Матрица плана и полученные значения параметров валика и тепловложения

Код образца	Параметры импульсного процесса			Глубина проплавления P , мм	Ширина валика W , мм	Площадь валика BA , мм ²	Коэффициент формы шва AR	Тепловложение HI , кДж/мм
	$I_{им}$, А	$T_{им}$, мс	S , см/мин					
S1	-1	-1	-1	2,36	8,79	12,04	3,725	0,75
S2	1	-1	-1	3,54	9,77	20,93	2,76	0,83
S3	-1	1	-1	3,4	9,24	18,88	2,718	0,87
S4	1	1	-1	3,85	9,8	23,29	2,545	0,97
S5	-1	-1	1	1,66	7,75	7,85	4,668	0,54
S6	1	-1	1	2,98	8,54	13,5	2,866	0,6
S7	-1	1	1	2,37	8,18	10,94	3,451	0,63
S8	1	1	1	3,43	9,33	18,15	2,72	0,70
S9	-1,682	0	0	1,90	7,89	8,62	4,153	0,66
S10	1,682	0	0	3,59	9,52	19,4	2,652	0,78
S11	0	-1,682	0	1,85	7,58	8,68	4,097	0,63
S12	0	1,682	0	3,73	8,79	22,5	2,357	0,81
S13	0	0	-1,682	3,84	10,26	24,66	2,672	0,98
S14	0	0	1,682	1,95	8,385	8,95	4,30	0,57
S15	0	0	0	3,45	9,1	18,44	2,638	0,72
S16	0	0	0	3,78	8,62	20,01	2,28	0,72
S17	0	0	0	3,48	9,14	20,63	2,626	0,72
S18	0	0	0	3,48	9,08	20,91	2,609	0,72
S19	0	0	0	3,84	8,73	21,58	2,273	0,72
S20	0	0	0	3,83	8,75	19,76	2,285	0,72



Коэффициенты приведенного выше полиномиального уравнения вычисляли по следующим уравнениям регрессии [10]:

$$b_0 = 0,166338((\sum X_0 Y) - 0,05679(\sum \sum X_{ii} Y)), \quad (5)$$

$$b_i = 0,073224(\sum X_i Y), \quad (6)$$

$$b_{ii} = 0,0625((\sum X_{ii} Y) + 0,006889(\sum \sum X_{ii} Y) - 0,056791(\sum X_0 Y)), \quad (7)$$

$$b_{ij} = 0,125000(\sum X_{ij} Y), \quad (8)$$

где X_i, X_{ii}, X_{ij} — значения членов первого порядка, квадратов второго порядка и взаимодействующих членов параметров процесса; Y — наблюдаемый отклик.

Первоначально математические модели разрабатывали с помощью коэффициентов, полученных из приведенных выше уравнений:

$$P = 3,637 + 0,502I_{им} + 0,415T_{им} - 0,431S - 0,278I_{им}^2 - 0,262T_{им}^2 - 0,225S^2 - 0,124I_{им}T_{им} + 0,094I_{им}S - 0,024T_{им}S, \quad (9)$$

$$W = 8,897 + 0,456I_{им} + 0,273T_{им} - 0,509S - 0,028I_{им}^2 - 0,212T_{им}^2 + 0,19S^2 - 0,007I_{им}T_{им} + 0,05I_{им}S + 0,092T_{им}S, \quad (10)$$

$$AR = 2,46 - 0,454I_{им} - 0,404T_{им} + 0,344S - 0,284I_{им}^2 + 0,222T_{им}^2 + 0,314S^2 + 0,233I_{им}T_{им} - 0,174I_{им}S - 0,183T_{им}S, \quad (11)$$

$$BA = 20,205 + 3,243I_{им} + 2,942T_{им} - 3,743S - 2,087I_{им}^2 - 1,528T_{им}^2 - 1,099S^2 - 0,365I_{им}T_{им} - 0,055I_{им}S - 0,183T_{им}S, \quad (12)$$

$$HI = 0,72 + 0,037I_{им} + 0,055T_{им} - 0,12S - 0,001I_{им}^2 - 0,001T_{им}^2 - 0,019S^2 + 0,004I_{им}T_{им} - 0,006I_{им}S - 0,009T_{им}S. \quad (13)$$

Значимость коэффициентов проверяли с помощью t -теста [12], а также метода обратного исключения, имеющегося в пакете математического обеспечения SYSTAT [13]. Окончательные модели разрабатывали с использованием значимых коэффициентов только после исключения незначимого коэффициента с соответствующим откликом.

Разработанные модели проверяли на адекватность с помощью регрессионного анализа. Значения скорректированного квадратичного кратного R и стандартной погрешности оценки как для полной, так и для сокращенной модели приведены в табл. 3. Установлено, что сокращенные модели лучше полных, поскольку имеют более высокие значения от-

Таблица 3. Сравнение квадратичных кратных величин R и стандартной погрешности оценки для полной и сокращенной модели

Параметр модели валика	Откорректированное квадратичное кратное R		Стандартная погрешность оценки	
	Полная модель	Сокращенная модель	Полная модель	Сокращенная модель
P	0,887	0,888	0,262	0,261
W	0,886	0,904	0,237	0,218
BA	0,899	0,919	1,766	1,583
AR	0,877	0,888	0,264	0,252

корректированного квадратичного кратного R и меньшие значения стандартной погрешности, чем в соответствующих полных моделях. Адекватность разработанных моделей также проверяли с помощью дисперсионного анализа (ANOVA) [14].

Окончательные математические модели с параметрами процесса в закодированной форме, определенные с помощью регрессионного анализа, следующие:

$$P = 3,637 + 0,502I_{им} + 0,419T_{им} - 0,433S - 0,276I_{им}^2 - 0,265T_{им}^2 - 0,226S^2, \quad (14)$$

$$W = 8,874 + 0,456I_{им} + 0,273T_{им} - 0,509S - 0,209T_{им}^2 + 0,193S^2, \quad (15)$$

$$AR = 2,46 - 0,454I_{им} - 0,404T_{им} + 0,344S - 0,284I_{им}^2 + 0,314S^2 + 0,233I_{им}T_{им} - 0,174I_{им}S, \quad (16)$$

$$BA = 20,205 + 3,243I_{им} + 2,942T_{им} - 3,743S - 2,087I_{им}^2 - 1,528T_{им}^2 - 1,099S^2, \quad (17)$$

$$HI = 0,72 + 0,037I_{им} + 0,055T_{им} - 0,12S - 0,001I_{им}^2 - 0,001T_{им}^2 - 0,019S^2 + 0,004I_{им}T_{им} - 0,006I_{им}S - 0,009T_{им}S. \quad (18)$$

Проверка модели. Точность моделей оценивали на том же экспериментальном оборудовании. Установлено, что разработанные модели позволяют прогнозировать параметры валика с достаточной степенью точности (табл. 4). Достоверность модели была также проверена путем составления диаграмм разброса, которые показывают степень совпадения экспериментальных и прогнозируемых значений размеров валика шва. Характерная диаграмма разброса площади валика показана на рис. 4.

Оптимизация площади валика. Поскольку процесс сварки должен обеспечить выполнение ряда требований (полное проплавление, минимальная площадь валика шва, ширину шва для обеспечения хорошего качества шва и максималь-



ную скорость сварки для повышения производительности и т. д.), оптимизация по одному из них является компромиссом [15, 16]. Разработанные модели использовали при уточнении параметров процесса импульсной дуговой сварки для обеспечения оптимальной геометрии валика шва. Площадь шва является важным параметром валика шва, который в свою очередь зависит от других параметров таких, как проплавление, ширина валика и коэффициент формы шва. Контроль площади валика шва обеспечивает минимальное тепловложение, лучший контроль других геометрических параметров валика, а также оптимальное использование сварочного источника питания.

На основании опытных испытаний выбраны оптимальные значения параметров. Результаты показали, что для получения хорошей геометрии валика шва с полным проплавлением необходимо обеспечить ширину валика шва менее 9 мм, глубину проплавления более 3,4 мм, коэффициент формы шва 2,5...3 и площадь валика 15...20 мм².

При оптимизации площадь валика принимали как объективную функцию, а проплавление, ширину валика, коэффициент формы шва и площадь валика — как уравнение связи. Путем сведения площади валика до минимума можно обеспечить минимальное тепловложение, что приведет к оптимальному использованию параметров процесса и мощности. Оптимизация процесса предусматривала решение нелинейной задачи ограниченной минимизации с использованием квазиютоновского метода численной оптимизации [16], который хорошо подходит для уравнения второго порядка, а также является простым, эффективным и быстрым [17, 18].

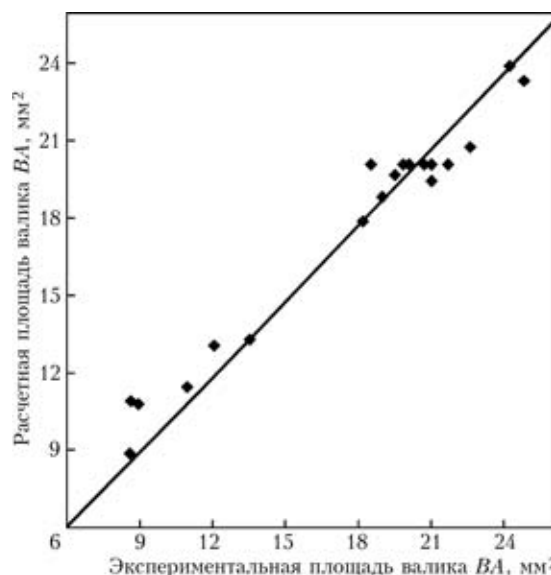


Рис. 4. Сопоставление разброса значений площади валика

Для оптимизации использовали программу из программного пакета MATLAB, вариант 7 (выпуск-14, 2004), а также «Solver», имеющийся в «Microsoft Excel» 2000.

Оптимизированные параметры импульсного процесса дуговой сварки: $I_{им} = 211,4$ А; $T_{им} = 537,65$ мс; $S = 16,51$ см/мин. Оптимизированные параметры валика: $P = 3,4$ мм; $W = 9$ мм; $AR = 2,572$; $BA = 17,89$ мм².

Были заданы параметры импульсной дуговой сварки, близкие к прогнозируемым оптимальным параметрам процесса, а также проведены лабораторные испытания на соответствие. Установлено, что полученные результаты с высокой точностью подтверждают прогнозируемые и экспе-

Таблица 4. Результаты соответствия экспериментальных и прогнозируемых значений

Номер теста	Параметры процесса			Проплавление P, мм			Ширина валика W, мм		
	$I_{им}$, А	$T_{им}$, мс	S, см/мин	Прогнозируемые значения	Полученные значения	Погрешность, %	Прогнозируемые значения	Полученные значения	Погрешность, %
1	200	550	17	3,11	2,98	-4,27	8,58	8,77	2,19
2	212	603	17,14	3,45	3,31	-4,15	9,11	9,23	1,37
3	211,4	537,65	16,51	3,40	3,28	-3,53	9,00	9,17	1,91
Средняя ошибка						-3,98	Средняя ошибка		1,82

Окончание табл. 4

Номер теста	Параметры процесса			Коэффициент формы шва AR			Площадь валика BA, мм ²		
	$I_{им}$, А	$T_{им}$, мс	S, см/мин	Прогнозируемые значения	Полученные значения	Погрешность, %	Прогнозируемые значения	Полученные значения	Погрешность, %
1	200	550	17	2,971	2,943	-0,96	16,28	17,051	4,73
2	212	603	17,14	2,721	2,788	2,45	18,51	19,017	2,74
3	211,4	537,65	16,51	2,572	2,795	-2,03	16,63	16,014	-3,70
Средняя ошибка						-0,18	Средняя ошибка		1,25

Примечание. Погрешность, % = (полученные значения - прогнозируемые) / прогнозируемые значения.



риментально полученные оптимальные параметры валика.

Результаты и их обсуждение. Разработаны математические модели, коррелирующие параметры импульсной дуговой сварки с геометрией валика шва, для сварки тонких листов аустенитной нержавеющей стали 304L.

Проанализированы возможные причины основного и совместного влияния параметров процесса импульсной сварки на параметры валика шва, представленные на рис. 5–9. Графики контурной поверхности и поверхности отклика были построены с использованием пакета «SYSTAT» [13].

Влияние тепловложения на параметры валика рассмотрено с использованием модели тепловложения (18). Из уравнений (14), (15) и (17) видно, что параметры процесса не оказывают влияния на P , W и BA , в то время, как из уравнения (16), очевидно, что коэффициент формы шва оказывает совместное влияние с другими параметрами (рис. 6–9).

Прямое влияние тока импульса $I_{им}$ на параметры валика шва и тепловложение. Как видно из рис. 5, а, $I_{им}$ повышается от 180 до 220 А, HI и W соответственно стабильно увеличиваются от 0,65 до 0,78 кДж/мм и от 8,107 до 9,641 мм. Параметры P и BA существенно повышаются от 2,01 до 3,86 мм и от 8,84 до 21,36 мм² соответственно при возрастании $I_{им}$ от 180 до 212 А и выше. Значения параметров P и BA снижаются не так существенно — соответственно до 3,7 м и 19,75 мм², в то время как AR вначале значительно снижается от 4,02 до 2,29 при повышении $I_{им}$ до 212 А, а затем увеличивается до 2,5 при повышении $I_{им}$ до 220 А. Параметр AR снижается вследствие значительного повышения W по сравнению с P при дальнейшем росте $I_{им}$. Скорость повышения BA высокая при росте $I_{им}$ от 180 до 212 А, что может быть следствием значительного повышения как P , так и W . Таким образом, повышение тока импульса $I_{им}$ положительно влияет на W и HI и неоднозначно на AR , BA и P .

Прямое воздействие длительности тока импульса $T_{им}$ на параметры валика шва и тепловложение. Как видно из рис. 5, б, $T_{им}$ повышается от 450 до 650 мс, HI стабильно увеличивается от 0,59 до 0,78 кДж/мм. Параметры W , P и BA существенно возрастают от 7,82 до 8,938 мм, от 2,18 до 3,79 мм и от 10,93 до 21,62 мм² соответственно при росте $T_{им}$ от 450 до 610 мс, а затем все параметры валика снижаются менее значительно при повышении $T_{им}$ свыше 610 мс. Ширина валика первоначально значительно возрастает при повышении $T_{им}$ до 550 мс, а при $T_{им} > 550$ мс благодаря постоянной ширине зоны дуги существенного изменения W не наблюдается. Значение AR вначале снижается от 3,76 до 2,27 при

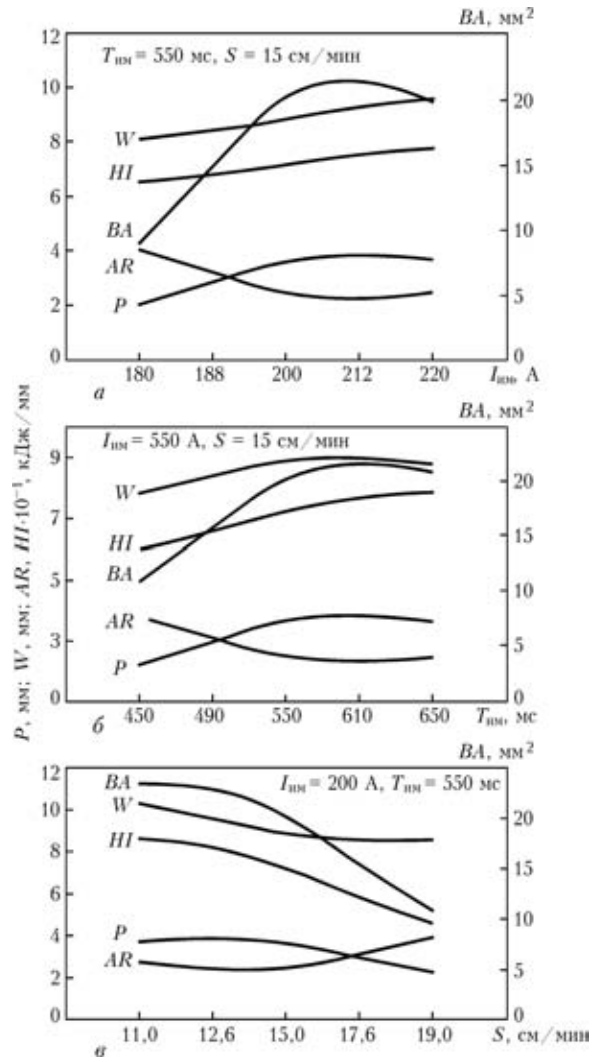


Рис. 5. Влияние тока импульса $I_{им}$ (а), длительности импульса $T_{им}$ (б), скорости сварки S (в) на параметры валика

повышении $T_{им}$ до 610 мс, а затем снижается менее значительно — до 2,41, т. е. проявляется та же тенденция, что и на рис. 4. Для площади валика BA характерна та же тенденция, что и для $I_{им}$ относительно BA (см. рис. 5), но при меньших значениях, что свидетельствует о меньшем влиянии $T_{им}$ на BA по сравнению с $I_{им}$. Следовательно, увеличение длительности тока импульса $T_{им}$ ока-

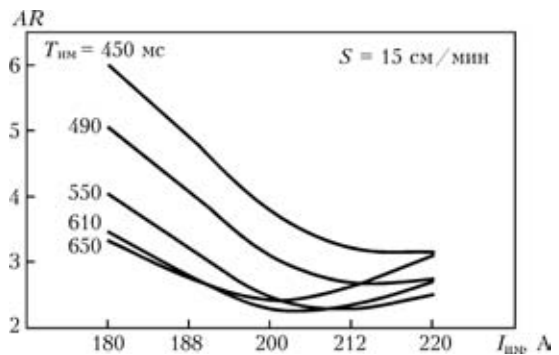


Рис. 6. Влияние взаимодействия тока импульса $I_{им}$ и длительности импульса тока $T_{им}$ на коэффициент формы AR

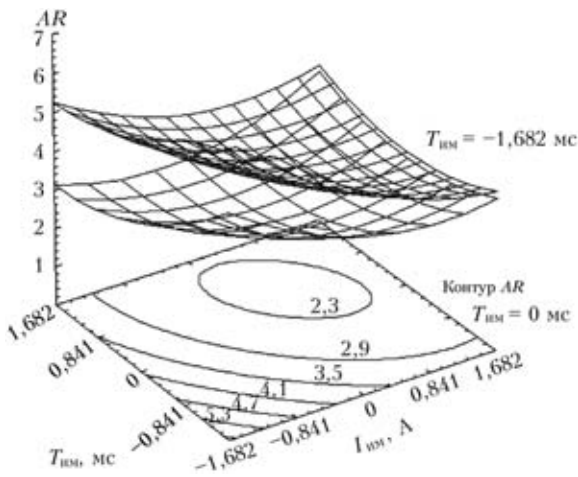


Рис. 7. Поверхность отклика и контурный график при взаимном влиянии тока импульса $I_{им}$ и длительности импульса тока $T_{им}$ на коэффициент формы AR

зывает положительное влияние на W и HI и неоднозначное на BA и P .

Прямое влияние скорости сварки S на параметры валика шва и тепловложение HI . Из рис. 5, в видно, что скорость сварки S повышается от 11 до 15 см/мин, HI , AR и BA снижаются не так значительно, P немного повышается. Дальнейшее повышение S свыше 15 см/мин приводит к значительному увеличению P , BA и HI . По мере роста S от 11 до 15 см/мин ширина валика первоначально уменьшается от 10,276 до 8,87 мм, а при $S \geq 15$ см/мин никакого значительного изменения ширины валика не наблюдается. При повышении S до 15 см/мин коэффициент формы шва первоначально снижается не так значительно — от 2,77 до 2,46, при $S \geq 15$ см/мин AR возрастает до 3,927. Очевидно, что при повышении S тепловложение в основной металл снижается, следовательно, плавление основного металла сокращается, что приводит к падению всех параметров валика. Первоначальное снижение AR может быть обусловлено значительным спадом W по сравнению с P при повышении S от 11 до 15 см/мин. Незначительное повышение AR при росте S свыше 15 см/мин может быть обусловлено уменьшением тепловложения, что приводит к значительному снижению P по сравнению с W . Следовательно, повышение S оказывает отрицательное влияние на P , BA и W и положительное на AR .

Совместное влияние тока импульса $I_{им}$ и длительности тока импульса $T_{им}$ на коэффициент формы AR (рис. 6). Очевидно, что при повышении $I_{им}$ от 180 до 200 А коэффициент AR значительно снижается для всех значений $T_{им}$, а при дальнейшем повышении $I_{им}$ до 220 А никаких значительных изменений AR при повышении $T_{им}$ от 450 до 490 мс не наблюдается, при $T_{им} = 550$ мс AR повышается не так значительно. Исходная тенденция снижения AR может быть обусловлена пре-

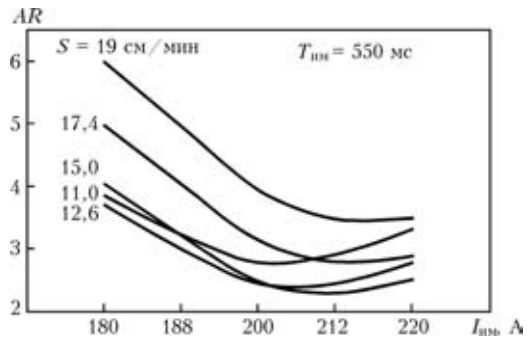


Рис. 8. Влияние тока импульса $I_{им}$ и скорости сварки S на коэффициент формы AR

обладающим влиянием $I_{им}$ на AR , а дальнейшее повышение AR может быть обусловлено преобладающим влиянием $T_{им}$ на AR . Установлено также, что AR является максимальным, когда $I_{им}$ и $T_{им}$ находятся на минимальном уровне, и минимальным, когда $I_{им} = 200$ А и $T_{им} = 610$ мс, а скорость сварки 15 см/мин. Следовательно, повышение $T_{им}$ оказывает преобладающее влияние на AR при росте $I_{им}$ свыше 200 А, что отражается на поверхности отклика и графиках контурной поверхности (рис. 7). Поверхность отклика показывает, что AR повышается при изменении S от минимального до максимального уровня для всех значений $I_{им}$ и $T_{им}$. Параметр AR максимальный, когда $I_{им}$ и $T_{им}$ находятся на минимальном уровне, а S — на максимальном.

Взаимное влияние тока импульса $I_{им}$ и скорости сварки S на AR . Из рис. 8 видно, что AR максимальный, когда $I_{им}$ и S находятся соответственно на минимальном и максимальном уровне, AR минимальный, когда $I_{им} = 212$ А и $S = 15$ см/мин. Очевидно, что по мере повышения $I_{им}$ от 180 до 200 А коэффициент AR вначале существенно снижается при всех значениях S , а при $I_{им} \geq 200$ А по мере снижения S от 15 до 11 см/мин AR повышается менее значительно, в то время как AR

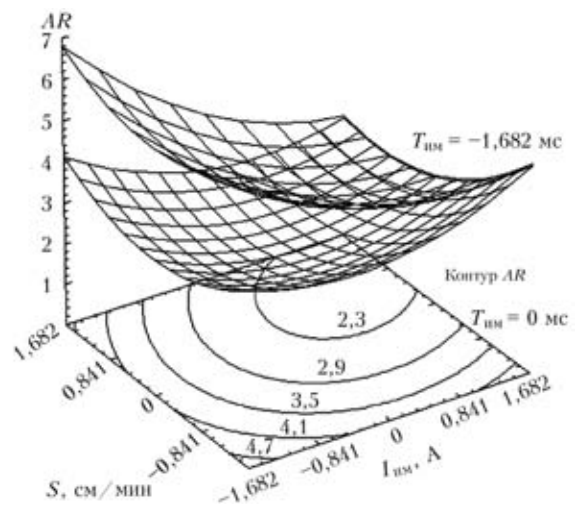


Рис. 9. Поверхность отклика и контурный график при взаимном влиянии тока импульса $I_{им}$ и скорости сварки S на коэффициент формы AR



становится более или менее стабильным, когда S снижается от 19 до 17,4 см/мин. Следовательно, повышение $I_{им}$ от 180 до 200 А оказывает преобладающее влияние на AR , в то время как снижение S оказывает преобладающее влияние на AR при повышении $I_{им}$ от 200 до 220 А. Это влияние также наглядно представлено на рис. 9, где показана поверхность отклика и контурные графики для совместного воздействия $I_{им}$ и S на AR . Очевидно, что AR снижается при изменении $T_{им}$ от минимального до максимального при всех значениях $I_{им}$ и S , AR максимально, когда $I_{им} = 180$ А, $T_{им} = 450$ мс и $S = 19$ см/мин.

Выводы

1. Для наглядного представления влияния параметров процесса импульсной дуговой сварки вольфрамовым электродом в защитных газах на параметры валика шва при сварке тонких листов нержавеющей стали (304L) можно использовать метод поверхности отклика.

2. Для разработки математических моделей прогнозирования геометрии валика в пределах рабочего диапазона параметров процесса использован метод пятиуровневого полнофакторного эксперимента. Установлено, что разработанная модель проплавления позволяет прогнозировать проплавление с точностью до 96 %, в то время как модели ширины валика, площади валика и коэффициента формы шва позволяют прогнозировать соответствующие параметры валиков с точностью до 98 % на основании испытания на соответствие.

3. Установлено, что ток импульса оказывает положительное влияние на ширину валика W и неоднозначное влияние на проплавление P и площадь валика шва BA . Длительность тока импульса оказывает неоднозначное влияние на P , W и BA , в то время как скорость сварки S негативно влияет на P , W и BA .

4. Пакет программ MATLAB может быть эффективно использован для оптимизации параметров импульсного дугового процесса при сварке тонких листов нержавеющей стали.

Mathematical models have been developed and described, which establish a relation between the controllable parameters of a pulsed welding process (pulsed current, pulse time, welding speed) and weld bead parameters (penetration, bead width, weld shape factor and weld bead area). Adequacy of models, based on the regression and dispersion analysis, is confirmed.

Авторы выражают благодарность Всеиндийскому совету по техническому образованию и Комитету по университетским грантам за предоставление финансовой помощи для выполнения данной работы.

1. Cornu J. Advanced welding system, TIG and related processes. — Springer-Ver., 1988. — Vol. 3.
2. Murugan N., Parmar R. S., Sud S. K. Effect of submerged arc process parameters on dilution and bead geometry in single wire surfacing // J. Mater. Proc. Technol. — 1993. — **37**. — P. 767–780.
3. Lothongkum G., Chaumbai P., Bhandhubanyong P. TIG pulse welding of 304L austenitic stainless steel in flat, vertical and overhead position // Ibid. — 1999. — **89/90**. — P. 410–414.
4. Troyer W., Tomsic M., Barhorst R. Investigation of pulsed wave shapes for gas tungsten arc welding // Welding J. — 1977. — **56**, № 1. — P. 26–32.
5. Omar A. A., Ludin C. D. Pulsed plasma-pulsed GTA arc: a study of process variables // Ibid. — 1979. — **58**, № 4. — P. 97–105.
6. Lothongkum G., Viyanit E., Bhandhubanyong P. TIG pulse welding parameters of the AISI 316L stainless steel plate at the 6–12h positions // J. Mater. Proc. Technol. — 2001. — **91/92**. — P. 312–316.
7. Leitner R. E., McElhinney G. H., Pruitt E. L. An investigation of pulsed GTA welding variables // Welding J. — 1973. — **52**, № 9. — P. 405–410.
8. Hames P., Smith B. L. Factorial techniques for weld quality prediction // Metal Construction. — 1993. — **15**. — P.128–130.
9. Adler Y. P., Markov E. V., Granovsky Y. V. The design of experiments to find optimal conditions. — М.: Mir, 1975.
10. Cochran W. G., G. M. Cox. Experimental designs. — New York: John Wiley & Sons publ., 1957.
11. Murugan N., Parmar R. S. Effects of MIG process parameters on the geometry of bead in automatic surfacing of stainless steel // J. Mater. Proc. Technol. — 1994. — **41**. — P. 381–398.
12. Gunaraj V., Murugan N. Prediction and optimization of weld bead volume for submerged arc process. Pt 1 // Welding J. — 2000. — **79**, № 10. — P. 286–294.
13. SYSTAT, Version 11, 2004, Systat Inc.
14. Montgomery D. C., Peck E. A. Introduction to linear regression analysis. — New York: John Wiley & Sons publ., 1992.
15. Jasbir S. A. Introduction to optimum design. — New York: McGraw Hill, 1989.
16. Arora J. S. Introduction of optimum design. — New York: McGraw Hill, 1989.
17. Gill P. E., Murray W. Practical Optimization. — New York: Acad. press, 1981.
18. Gunaraj V., Murugan N. Prediction and optimization of weld bead volume for submerged arc process. Pt 2 // Welding J. — 2000. — **79**, № 11. — P. 331–294.

Поступила в редакцию 13.01.2006



ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ СКОРОСТЯМИ ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧИ ПРОВОЛОКИ И ЕЕ ПЛАВЛЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ С КОРОТКИМИ ЗАМЫКАНИЯМИ

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

Рассмотрена математическая модель, описывающая зависимость тока дугового процесса и соответственно скорости плавления электродной проволоки от изменяющегося характера ее движения в процессе сварки плавящимся электродом, в частности, при коротких замыканиях дугового промежутка.

Ключевые слова: дуговая сварка, механизированный процесс, электроды, импульсы, скорость плавления, сварочный ток, математическая модель

В последнее время все большее внимание уделяется дуговой механизированной сварке с импульсным воздействием на процесс за счет импульсов тока от специальных источников (импульсно-дуговой процесс) или применения импульсной подачи электродной проволоки. Эти воздействия дают определенные преимущества по сравнению со стационарными (невозмущенными) процессами.

В технической литературе опубликован ряд материалов, в которых рассматриваются проблемы, связанные с технологическими особенностями использования импульсной подачи проволоки [1] и техническими средствами реализации такого движения [2]. Однако недостаточно внимания уделено исследованиям, связанным с влиянием изменяющейся скорости подачи на параметры дугового процесса, в частности, такой важной характеристики, как скорость плавления электродной проволоки. Знание этих закономерностей необходимо как для определения параметров движения проволоки в зону горения дуги и элементов управления переносом электродного металла в сварочную ванну, так и для оценки влияния возмущений в системе подачи (отклонений в скорости подачи по сравнению с заданным значением) на формирование сварочного шва и характеристики процесса сварки в целом.

Целью настоящей работы является получение аналитической зависимости между скоростью подачи электродной проволоки и скоростью ее плавления при изменяющемся характере движения проволоки, в частности, для случая специально используемой импульсной подачи.

В работе [3] выведено уравнение, связывающее сварочный ток и скорость подачи электродной проволоки, для процесса дуговой сварки плавя-

щимся электродом в защитном газе с короткими замыканиями дугового промежутка:

$$\frac{L}{R_3 + 0,5b} \frac{d^2 I_c}{dt^2} + \frac{dI_c}{dt} + \frac{ANE_c I_c}{R_3 + 0,5s} = \frac{v_n E_c}{R_3 + 0,5s}, \quad (1)$$

где L — индуктивность сварочной цепи; R_3 — эквивалентное сопротивление сварочной цепи; E_c — напряженность электрического поля в столбе дуги; b — коэффициент, характеризующий наклон статической характеристики дуги к оси токов; $A = 1/\pi r_s^2 M$; $H = U_{x,x}(0,285 - 0,0052U_{x,x})$; $U_{x,x}$ — напряжение холостого хода; $M = C_n \gamma_n T_n - C_o \gamma_o T_o + r_n \gamma_n$; C_n, C_o — теплоемкость металла соответственно при температурах плавления и окружающей среды; γ_n, γ_o — плотность металла при температурах соответственно плавления и окружающей среды; r_n — скрытая теплота плавления; T_n, T_o — соответственно температура плавления электродного металла и окружающей среды.

Это уравнение достаточно сложное для решения и использования при выборе параметров управляемой импульсной подачи. Для упрощения преобразуем его в вид, удобный для решения методами операторного исчисления, приняв, что скорость подачи электродной проволоки v_n — входное воздействие, а ток дугового процесса I_c — выходное:

$$\frac{I_c(p)}{v_n(p)} = \frac{E_c / (R_3 + 0,5s)}{T_1 p^2 + p + k}, \quad (2)$$

где p — оператор дифференциального исчисления; $T_1 = L / (R_3 + 0,5s)$; $k = ANE_c / (R_3 + 0,5s)$.

Уравнение (2) в операторной форме представляет собой передаточную функцию системы источник сварочного тока — механизированный процесс сварки с короткими замыканиями дугового промежутка. Влияние скорости подачи электродной проволоки на сварочный ток можно изучать, задав различные законы движения проволоки.



Рассмотрим синусоидальное изменение скорости подачи как одного из наиболее распространенных законов, целенаправленно реализуемых посредством механизмов импульсной подачи. Этот закон можно записать в виде (рис. 1, а):

$$v_{\text{п}} = V_{\text{п}} |\sin \omega t|, \quad (3)$$

где $V_{\text{п}}$ — амплитудное значение скорости подачи; ω — частота следования импульсов.

Можно найти изображение в операторной форме входной величины, которой является скорость подачи электродной проволоки, основываясь на уравнении (3) и данных работы [4]. Однако в этом случае решение (поиск оригинала) уравнения в операторной форме при поиске выходной величины (тока сварки I_c) будет достаточно сложным и громоздким.

Упростим задачу и детально рассмотрим форму импульсов подачи, получаемую при использовании реального механизма импульсной подачи и прохождения импульсов по направляющему каналу. Рассматриваемые импульсы, как правило, не имеют резких переходов (сказываются люфты и особенности формирования импульсов в механизме подачи и запаздывания в направляющем канале, особенности формирования импульсов с реверсивным движением электродной проволоки). Исходя из анализа реальных осциллограмм скорости подачи [5], формализованную форму импульса можно представить в виде, показанном на рис. 1, б. Для этого случая правомерным будет представление изображения входной величины (скорости импульсной подачи электродной проволоки) в следующем виде:

$$v_{\text{п}}(p) = \frac{(A+B)\omega}{p^2 + \omega^2}, \quad (4)$$

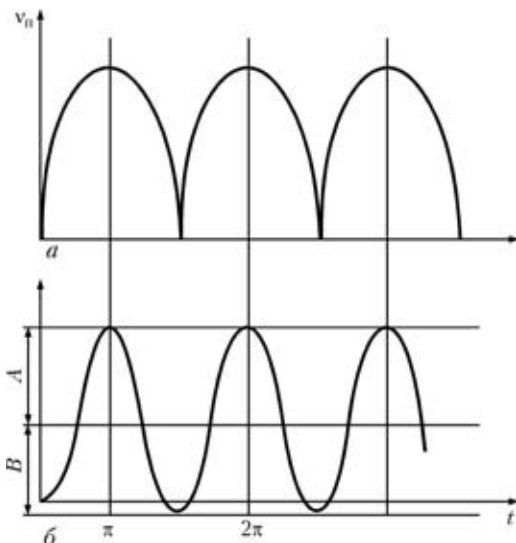


Рис. 1. Расчетная (а) и близкая к реальной (б) формы импульсов подачи

где A и B обозначены на рис. 1.

Исходя из уравнений (2) и (4) представим изображение тока сварки I_c в следующем виде:

$$I_c(p) = \frac{(A+B)D\omega}{(p^2 + \omega^2)(T_1 p^2 + p + k)} = \frac{(A+B)D\omega}{T_1 p(p^2 + \omega^2) [p^2 + (p/T_1) + (k/T_1)]}, \quad (5)$$

где $D = E_c / (R_3 + 0,5s)$.

Уравнение (5) можно решить, перейдя от изображения выходной величины $I_c(p)$ к ее оригиналу $I_c(t)$, т. е. $I_c(p) = I_c(t)$, при этом указанный переход целесообразнее всего можно найти, пользуясь таблицами операторных изображений [6]. Наиболее близкой табличной формулой является следующая:

$$F(p) = \frac{1}{(p^2 + c^2) [(p+a)^2 + b^2]},$$

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{(\delta^2 - c^2)^2 + 4a^2 c^2}} \times$$

$$\times \left[\frac{1}{c} - \sin(ct - \lambda) + \frac{1}{b} e^{-at} \sin(bt - \mu) \right], \quad (6)$$

где

$$\lambda = \arctg \frac{2ac}{\delta^2 - c^2}; \quad \mu = \arctg \frac{-2ab}{a^2 - b^2 + c^2}; \quad \delta^2 = a^2 + b^2.$$

Приравняв соответствующие коэффициенты знаменателей уравнений (5) и (6), получим следующие выражения для определения a, b, c :

$$a = 1/2T_1; \quad a^2 + b^2 = k/T_1; \quad b = (\sqrt{4kT_1 - 1})/2T_1; \quad c = \omega. \quad (7)$$

В выражениях (7) величина b определяет частоту вынужденных колебаний системы источник сварочного тока — дуговой процесс.

Можно указать, что при импульсной подаче интегральная скорость подачи электродной проволоки связана со скоростью подачи в импульсе следующей зависимостью:

$$v_{\text{п}} = f(t) = \xi h, \quad (8)$$

где ξ, h — соответственно частота и шаг импульсной подачи.

Учитывая, что рекомендуемый в работе [7] шаг связан с диаметром электродной проволоки d_3 зависимостью $h = 1,2d_3$, уравнение (8) запишем в следующем виде:

$$v_{\text{п}} = (1,2 \dots 1,4) d_3 \xi. \quad (9)$$

Известно, что интегральная скорость подачи $v_{\text{п}}$ при гармоническом законе ее изменения (см. уравнение (3)) связана с амплитудным значением зависимостью



$$v_{\text{пл}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{T/2} V_{\text{пл}} \sin \omega t = \frac{2}{\pi} V_{\text{пл}}, \quad (10)$$

где T — период следования импульса подачи.

Амплитудное значение скорости подачи $v_{\text{пл}}$ с учетом (9), (10) может быть представлено в виде

$$V_{\text{пл}} = \pi(1,2...1,4)d_3\xi/2 \approx 2d_3\xi. \quad (11)$$

Учитывая постоянные сомножители уравнения (5) B , D и T_1 , а также то, что колебания скорости подачи электродной проволоки смещены относительно оси абсцисс на величину

$$B = k_{\phi} V_{\text{пл}}, \quad (12)$$

где k_{ϕ} — величина, характеризующая форму импульса подачи), в окончательном виде получаем искомую зависимость $I_c(t)$ для случая импульсной подачи электродной проволоки

$$I_c(t) = \frac{BD}{T_1 \sqrt{(\delta^2 - c^2)^2 + 4a^2c^2}} + \frac{(A+B)D}{T_1 \sqrt{(\delta^2 - c^2)^2 + 4a^2c^2}} \times [\sin(ct - \lambda) + \frac{c}{b} e^{-at} \sin(bt - \mu)]. \quad (13)$$

Уравнение (13) является математической моделью, которая в аналитической форме описывает зависимость между изменяющейся по гармоническому закону скоростью подачи проволоки и током сварки. Эта модель справедлива для исследования одиночного импульса подачи, но так как процесс с короткими замыканиями является периодическим и его частота при правильно подобранных параметрах импульсной подачи [8] соответствует частоте следования импульсов, предложенный подход к описанию указанной зависимости следует считать приемлемым.

Предварительный анализ уравнения (13) показывает, что при импульсной подаче электродной проволоки ток в сварочной цепи носит колебательный характер, но при этом частота и амплитуда этих колебаний определяется одновременно двумя составляющими: как следствие изменения скорости подачи проволоки и в результате асимптотически затухающих колебательных переходных процессов в плавлении электродной проволоки.

На основании уравнения (13) были рассчитаны параметры колебаний тока сварки при использовании импульсной подачи электродной проволоки. Эти расчеты в графическом виде представлены на рис. 2.

Как и следовало ожидать, при разной частоте импульсной подачи и переходного процесса их результирующее значение зависит от достаточно

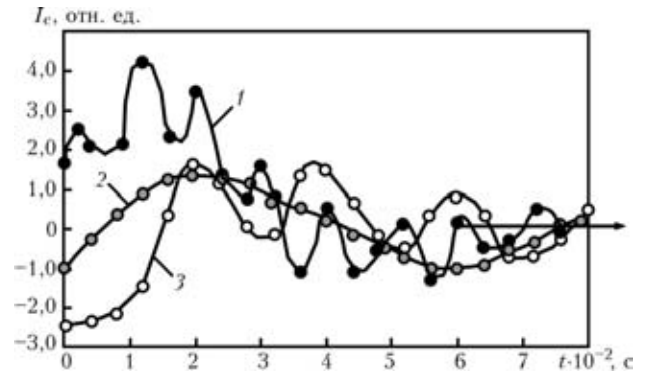


Рис. 2. Относительные колебания тока сварки при импульсной подаче электродной проволоки с синусоидальным характером движения ($b = 14 \text{ c}^{-1}$): 1 — $c = 100$; 2 — 14; 3 — 50 c^{-1}

большого количества параметров, а также особенностей плавления электродной проволоки при дуговом процессе с использованием плавящегося электрода, характеристик источника сварочного тока и параметров сварочной цепи.

Важным является то, что изменения (колебания) сварочного тока, обусловленные импульсным характером движения проволоки и колебательным переходным процессом системы дугодуговой процесс, происходят не синхронно с изменением скорости подачи электродной проволоки, а с определенным (вычисляемым) сдвигом от них на время, зависящее от характеристик указанной системы, а также существенные превышения сварочного тока в начальный момент действия импульса подачи над его колебаниями в установившемся режиме. Последний при сварке с короткими замыканиями дугового промежутка принят как гипотетический для оценки уровней изменения тока в зависимости от скорости подачи.

Учитывая, что скорость плавления электродной проволоки $v_{\text{пл}}$ безынерционно следует за изменениями сварочного тока и пропорциональна ему, а также учитывая уравнения (8), (12) и (13), можно представить в окончательном виде уравнение, связывающее скорость подачи электродной проволоки и ее скорость плавления в следующем общем виде:

$$v_{\text{пл}}(t) = \frac{k_I f h \pi D / 2}{T_1 \sqrt{(\delta^2 - c^2)^2 + 4a^2c^2}} \times \left\{ \frac{1}{2} + [\sin(ct - \lambda) + \frac{c}{b} e^{-at} \sin(bt - \mu)] \right\}, \quad (14)$$

где k_I — коэффициент пропорциональности, характеризующий степень зависимости $v_{\text{пл}} = f(I_c)$, которая, как правило, принимается прямо пропорциональной.

Самым доказательным примером подтверждения результатов проведенного исследования является существование принудительных коротких замыканий дугового промежутка с частотой им-

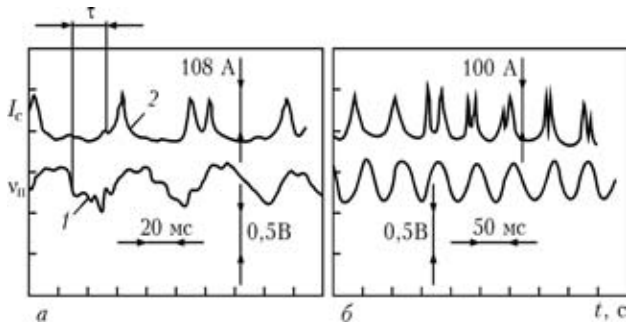


Рис. 3. Осциллограммы синхронной записи скорости подачи импульсного движения электродной проволоки (1) и тока дугового процесса (2): $a - c = 20 \text{ с}^{-1}$; $b \approx 30 \text{ с}^{-1}$; $\delta - c = 20 \text{ с}^{-1}$; $b \approx 20 \text{ с}^{-1}$

пульсной подачи как следствия плавления проволоки по закону, задаваемому импульсной подачей с присущими ей ускорениями в плавлении электродной проволоки в каждом импульсе и замыканию капель дугового промежутка в момент действия импульса. На рис. 3 приведены экспериментально полученные характерные осциллограммы синхронной регистрации скорости импульсного движения проволоки, воспроизводимого механизмом подачи с синусоидальным законом формирования, и тока дугового процесса. Запаздывание импульса в направляющем канале, соответствующее выводам работы [9], в настоящем эксперименте исключено из-за максимального приближения устройства регистрации скорости подачи к месту ведения дугового процесса. Видно некоторый фазовый сдвиг τ между скоростью подачи электродной проволоки и током дугового процесса, а также заметна разница в форме кривой тока сварки при разных значениях параметров c и b .

Выводы

1. Импульсный характер подачи электродной проволоки оказывает существенное влияние на ток дугового процесса, и, как следствие, скорость плавления электродной проволоки, вызывая их колебания.

Mathematical model is considered, describing dependence of the arc process current and the rate of melting of electrode wire on the variable character of its movement in the process of metal-arc welding, in particular, in short-circuiting of the arc gap.

2. Параметры колебаний сварочного тока и скорости плавления электродной проволоки при ее импульсном движении обусловлены как характеристиками импульсов подачи с их периодическим воздействием, так и характеристиками системы источник сварочного тока–дуговой процесс, представляющими собой аperiodический переходный процесс.

3. Полученная математическая модель, описывающая в аналитической форме зависимость между скоростью подачи электродной проволоки и скоростью ее плавления, может быть использована для расчета условий управления переносом электродного металла при целенаправленно задаваемых импульсах, а также для оценки влияния отклонений в скорости подачи, возникающих по различным причинам, на формирование сварного соединения.

1. Вороний Н. М. Параметры режимов и технологические возможности дуговой сварки с импульсной подачей электродной и присадочной проволоки // Автомат. сварка. — 1996. — № 10. — С. 3–9.
2. Лебедев В. А., Мошкин В. Ф., Пичак В. Г. Новые механизмы для импульсной подачи электродной проволоки // Там же. — 1996. — № 5. — С. 39–44.
3. Попков А. М. Об устойчивости системы источника питания — дуга при сварке с систематическими короткими замыканиями дугового промежутка // Свароч. пр-во. — 1980. — № 3. — С. 11–13.
4. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория автоматического регулирования. — М.: Наука, 1972. — 768 с.
5. Анализ технических и технологических возможностей импульсной подачи электродной проволоки в процессах дуговой сварки и наплавки / Б. Е. Патон, В. А. Лебедев, В. Г. Пичак и др. // Свароч. пр-во. — 2002. — № 2. — С. 24–31.
6. Диткин В. А., Кузнецов П. И. Справочник по операционному исчислению. — Л.: Гостехтеориздат, 1951. — 255 с.
7. Потатьевский А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. — М.: Машиностроение, 1974. — 240 с.
8. Лебедев В. А., Пичак В. Г. Механизированная дуговая сварка в CO_2 с регулируемой импульсной подачей электродной проволоки // Свароч. пр-во. — 1998. — № 5. — С. 30–33.
9. Лебедев В. А. Влияние направляющего канала сварочного полуавтомата на параметры импульсной подачи электродной проволоки // Автомат. сварка. — 1999. — № 2. — С. 45–48.

Поступила в редакцию 20.01.2005



ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЗОНЫ СПЛАВЛЕНИЯ СТАЛИ 10X13Г18Д

А. И. ГЕДРОВИЧ, д-р техн. наук (Восточноукр. гос. ун-т им. В. Даля),
А. Н. ТКАЧЕНКО, С. А. ТКАЧЕНКО, инженеры (ОАО «ХК «Лугансктепловоз»),
А. Т. ЗЕЛЬНИЧЕНКО, канд. физ.-мат. наук, **И. И. АЛЕКСЕЕНКО**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
В. Л. БОНДАРЕНКО, инж. (ООО «Фрониус Украина», с. Княжичи, Киевская обл.)

Рассмотрены особенности реакции аустенитной стали 10X13Г18Д в виде холоднокатаного проката на термомеханический цикл дуговой сварки. Показан характер фазовых превращений в зоне сплавления стали 10X13Г18Д в однородных и разнородных соединениях ее со сталью 09Г2С. Снижение погонной энергии сварки в значительной мере предупреждает разупрочнение металла в зоне сплавления сварных соединений и снижает вероятность выделения в ней δ -феррита.

Ключевые слова: дуговая сварка, хромомарганцевая сталь, сварные соединения, зона сплавления, фазовые превращения, δ -феррит, разупрочнение, погонная энергия сварки

Аустенитная хромомарганцевая сталь 10X13Г18Д (ДИБ1) была разработана [1] с целью применения в качестве коррозионностойкого материала при изготовлении товаров народного потребления, медицинского оборудования, изделий пищевого машиностроения, теплообменной аппаратуры и других изделий, находящихся в контакте со слабоагрессивными средами. В Украине имеется опыт ее применения в виде тонколистового холоднокатаного проката при обшивке вагонов дизель-электропоездов в ОАО «ХК «Лугансктепловоз» [2]. В процессе ходовых испытаний вагонов, а также эксплуатации их на железных дорогах в условиях воздействия знакопеременных и динамических нагрузок были выявлены случаи возникновения и развития трещин в зоне сплавления (ЗС) сварных соединений как стали 10X13Г18Д, так и ее соединений со сталью 09Г2С (со стороны стали 10X13Г18Д). В результате в участки разрушения проникает атмосферная влага, наблюдается развитие местной коррозии и нарушение эстетики металлоизделия.

Ранее отмечалось [3], что в ЗС сварных соединений холоднодеформированных листов из стали 10X13Г18Д, выполненных механизированной сваркой в CO_2 аустенитной проволокой Св-08Х20Н9Г7, наблюдается образование α -мартенсита в количестве 1...2 об. %. Его появлению способствуют значительные остаточные напряжения растяжения в зоне сварки, возникающие под воздействием сварочного термомеханического цикла [3]. По мере вылеживания сварных заготовок отмечалось снижение содержания α -мартенсита в металле ЗТВ соединений в результате

релаксации в них напряжений и потери стабильности геометрических размеров. Следствием структурных превращений при сварке являются одновременно пониженные прочностные и пластические свойства металла в ЗС. Так, угол загиба сварных соединений не превышает 90...100°, а место разрушения разрывных образцов приходится на ЗС. Повысить отмеченные свойства удастся лишь в условиях ускоренного охлаждения соединений при сварке, достигаемого с помощью специальных охлаждающих реагентов и приспособлений [3]. В этом случае обеспечивается снижение доли α -мартенсита в металле ЗС до 0,5 % и повышение пластичности соединений. К сожалению, из отмеченного не ясно в результате чего наблюдается одновременное снижение прочностных и пластических свойств металла в ЗС соединений под воздействием термического цикла сварки (появление α -мартенсита в ЗС должно сопровождаться повышением прочностных характеристик металла в этом участке).

Цель настоящей работы — углубление представлений о причинах охрупчивания сварных соединений стали 10X13Г18Д и на этой основе предложение путей оптимизации технологии сварки.

Вначале были проанализированы свойства и особенности применения аустенитной стали 10X13Г18Д. После оптимальной термической обработки (закалка с температурой нагрева 1000...1050 °С и охлаждением в воде) по технологичности она не уступает хромоникелевым сталям типа 18-10 [1]. Снижение температуры заковки (например, до 860 °С) увеличивает $\sigma_{\text{в}}$ с 670 до 780 МПа, $\sigma_{0,2}$ с 300 до 360 МПа, уменьшает показатели пластичности и вязкости. Подобным образом влияет и степень пластической деформации закаленной стали при холодной прокатке



на тонкий лист. Например, при степени обжатия 20 % σ_b достигает 910, $\sigma_{0,2}$ — 790 МПа при $\delta = 30$ %. Увеличение степени пластической деформации может быть причиной мартенситного превращения в стали и резкого снижения пластических свойств.

Таким образом, использование высоких прочностных свойств холоднодеформированных листов из стали 10X13Г18Д априори является привлекательным для конструкторов и проектировщиков с точки зрения реализации снижения массы сварных конструкций. Вместе с тем в таком исходном состоянии металла при дальнейшем технологическом переделе можно ожидать нарушения стабильности твердого раствора аустенита, что, в свою очередь, может влиять на физико-механические свойства сварных соединений стали, их технологичность и эксплуатационные свойства.

С учетом изложенных выше предпосылок в работе исследовали однопроходные стыковые сварные соединения нагартованной стали 10X13Г18Д толщиной 1,5 мм следующего химического состава, мас. %: 0,11 С; 0,45 Si; 17,01 Mn; 13,22 Cr; 1,39 Ni; 0,022 S; 0,030 P; 0,80 Cu. Выполняли также однопроходные нахлесточные соединения этой стали толщиной 1,5 мм со сталью 09Г2С толщиной 2,5 мм. Разновидности использованных технологий сварки приведены в табл. 1. Значение погонной энергии сварки определяли расчетным методом [4], остаточные напряжения в сварных соединениях — с использованием электронной спекл-интерферометрии [5].

Образцы поперечных сечений соединений предварительно разрезали по центру шва для определения участка соединения со стороны стали 09Г2С. Подготовленные микрошлифы подвергали электролитическому травлению в растворе 5%-й H_2SO_4 . Металлографические исследования проводили с использованием светового микроскопа «Неофот-32» и микротвердометра ПМТ-3. Оценку структурной неоднородности и фазового состава соединений выполняли с помощью растрового электронного микроскопа JSM-840 фирмы «JEOL», оборудованного платой захвата изображений MicroCapture с последующей регистрацией изображения на экране компьютера, и феррометра «Ferritgehaltmesser 1.53» (диапазон измерений 0...1, 0...3 и 0...12 об. %).

Экспериментальные результаты. Результаты испытаний образцов на растяжение приведены в табл. 1. Наименьшее сопротивление разрушению демонстрируют сварные однородные (10X13Г18Д+10X13Г18Д) и разнородные (10X13Г18Д+09Г2С) соединения, выполненные полуавтоматической сваркой в CO_2 . В обоих случаях разрушение локализуется в ЗС, причем во втором — со стороны стали 10X13Г18Д. Заметное повышение прочностных свойств наблюдается при выполнении технологического валика по ЗС металла шва со сталью 10X13Г18Д, а также при использовании технологий сварки с низкой погонной энергией (импульсная сварка и процесс холодного переноса металла — СМТ). Отмечается определенная корреляция между содержанием

Таблица 1. Технологии и режимы сварки при выполнении экспериментальных однопроходных соединений

Номер соединения	Свариваемая сталь (стали)	Вид соединения, технология сварки (режимы сварки) и погонная энергия	Среднее усилие разрыва соединений, МПа	Место разрушения
1	10X13Г18Д+10X13Г18Д	Стыковое, полуавтоматическая в CO_2 проволокой Св-08Х20Н9Г7 $\varnothing 1,2$ мм ($I_{св} = 110...120$ А; $U_d = 20...21$ В; $v_{св} = 16...18$ м/ч; $q_{св} = 3350$ Дж/см)	15293	ЗС
2	10X13Г18Д+09Г2С	Нахлесточное, полуавтоматическая в CO_2 проволокой Св-08Х20Н9Г7 $\varnothing 1,2$ мм ($I_{св} = 110...120$ А; $U_d = 20...21$ В; $v_{св} = 16...18$ м/ч; $q_{св} = 3350$ Дж/см)	17262	ЗС со стороны 10X13Г18Д
3	10X13Г18Д+09Г2С	Нахлесточное, то же + технологический валик с неплавящимся электродом в среде аргона по линии сплавления металла шва со сталью 10X13Г18Д с лицевой стороны соединения ($I_{св} = 60...65$ А, $U_d = 10...12$ В, $v_{св} = 17...18$ м/ч)	18023	Основной металл 09Г2С
4	10X13Г18Д+09Г2С	Нахлесточное, автоматическая импульсная сварка в аргоне на роботизированном комплексе TRS 5000 СМТ фирмы «Фрониус» ($I_{св} = 178$ А; $U_d = 19,8$ В; $v_{св} = 90$ м/ч; $v_{п.э} = 4$ м/мин; $q_{св} = 1190$ Дж/см)	18000	ЗТВ со стороны стали 09Г2С
5	10X13Г18Д+09Г2С	Нахлесточное, автоматическая «холодная» сварка (СМТ-процесс [6]) в CO_2 на роботизированном комплексе TRS 5000 СМТ ($I_{св} = 99$ А; $U_d = 24,6$ В; $v_{св} = 46,8$ м/ч; $v_{п.э} = 4$ м/мин; $q_{св} = 1320$ Дж/см)	1826	Металл шва
6	10X13Г18Д+09Г2С	Нахлесточное, полуавтоматическая «холодная» сварка (СМТ-процесс [7]) в аргоне на полуавтомате TRS 2700 СМТ фирмы «Фрониус» ($I_{св} = 106$ А; $U_d = 15,9$ В; $v_{п.э} = 3,2$ м/мин; $v_{св} = 38,2$ м/ч; $q_{св} = 1105$ Дж/см)	1863	Основной металл 10X13Г18Д вдали от ЗТВ

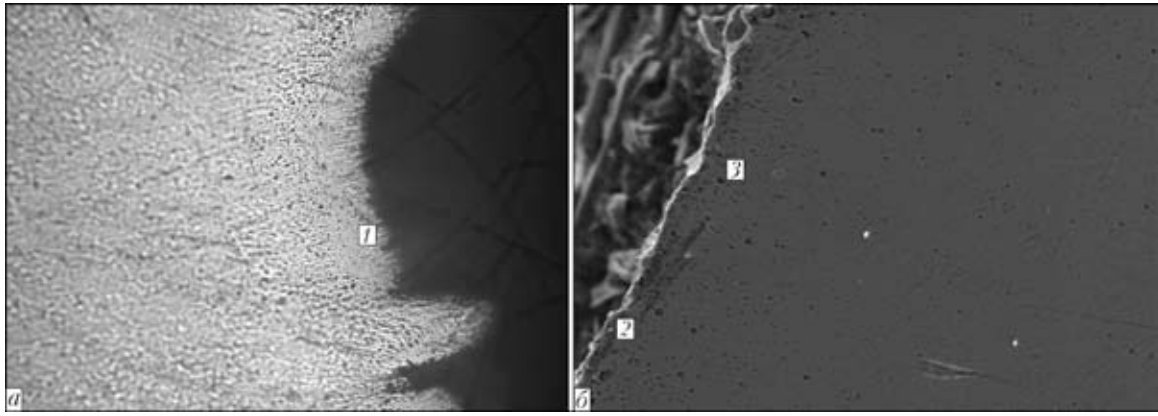


Рис. 1. Микроструктура металла стыкового соединения стали 10X13Г18Д после испытаний на растяжение со стороны металла шва (а), $\times 400$ и со стороны стали (б), $\times 1500$: 1–3 — участки фазового анализа

магнитной составляющей в ЗС соединений, усилием разрыва образцов и погонной энергией сварки. Минимальному усилию разрушения соединений № 1 и 2 табл. 1 соответствует большее содержание магнитной фазы в ЗС (4, 5 и 2,5 об. %) и большее значение погонной энергии (3350 Дж/см). В условиях импульсной сварки и СМТ-процесса содержание магнитной фазы в ЗС составляет соответственно 0,1...0,2 и 0,5...0,8 об. %. В самой стали 10X13Г18Д вдали от зоны сварки магнитная фаза отсутствует и лишь в локальных участках ее содержится до 0,01 об. %.

Металл шва при использовании проволоки Св-08Х20Н9Г7 во всех вариантах технологий содержит магнитную составляющую в виде δ -феррита в количестве от 0,7...1,2 (соединение № 1) до 0,7...10,0 об. % (соединение № 3 табл. 1).

Из образцов, разрушенных по ЗС (соединение № 2 табл. 1), были изготовлены микрошлифы для оценки как состава твердого раствора металла у границы разрушения, так и его отдельных структурных фаз с локальностью 1 мкм (рис. 1). Результаты оценки распределения легирующих элементов в соединении, сведенные в табл. 2, свидетельствуют о том, что образец разрушается по ЗС металла шва с прилегающим к нему высокотемпературным участком ЗТВ стали 10X13Г18Д. В последнем под влиянием термоцикла сварки обнаруживаются выделения второй фазы, обогащенной хромом, что позволяет ее идентифицировать как высокотемпературный δ -феррит. Как уже отмечалось выше, интенсивность выделения второй фазы в ЗС коррелирует с погонной энергией сварки (рис. 2). Наблюдаемые в локальных участках

Т а б л и ц а 2. Содержание легирующих элементов (мас. %) в структурных составляющих металла ЗС соединений 10X13Г18Д+09Г2С со стороны аустенитной стали

Объект анализа	Cr	Ni	Mn	Cu
Твердый раствор аустенитной матрицы: участок 1, рис. 1, а	12,26	5,92	4,26	0,323
участок 2, рис. 1, б	13,35	1,16	16,19	0,755
Фазовое выделение (участок 3, рис. 1, б)	23,08	1,06	13,10	0,580

стали 10X13Г18Д (обычно вдоль строчек проката) выделения (рис. 3) также являются δ -ферритом и свидетельствуют об определенной металлургической предыстории металла.

Выполнение технологического валика (соединение № 3 табл. 1) неплавящимся электродом в аргоне по линии сплав-

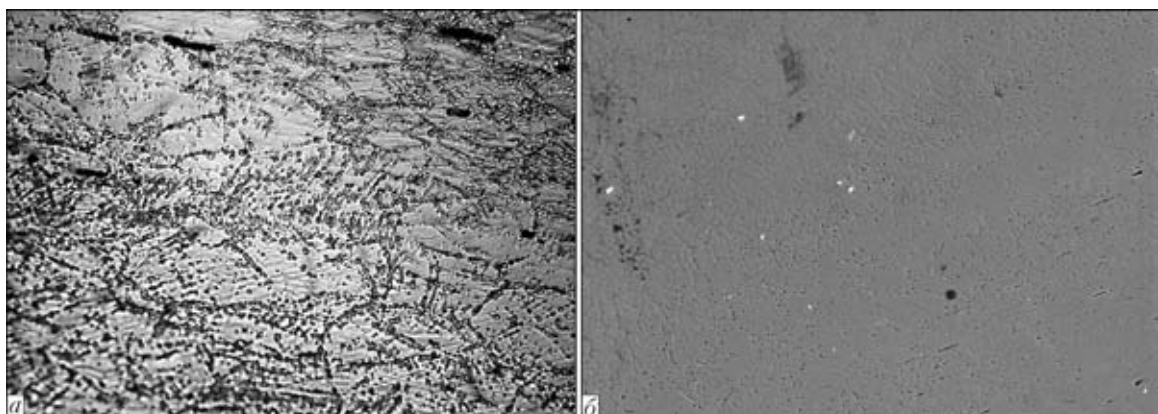


Рис. 2. Микроструктура металла в ЗС стали 10X13Г18Д соединений 10X13Г18Д+09Г2С с различной интенсивностью выделений δ -феррита: а — механизированная сварка в CO_2 , $\times 1000$; б — СМТ-процесс, $\times 500$

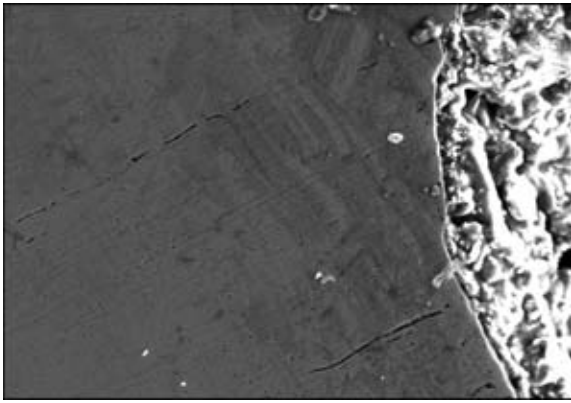


Рис. 3. Микроструктура металла разрывного образца соединения 10X13Г18Д+09Г2С со строчечными выделениями δ -феррита, $\times 300$

ления металла шва со сталью 10X13Г18Д вносит определенные коррективы в формирование структурной неоднородности (рис. 4). Судя по травимости металла ЗС на микрошлифе, высокотемпературный δ -феррит возникает в ЗС как основного шва, так и технологического. Ширина зоны выделений составляет 0,1...0,25 мм.

Появление δ -феррита обусловлено структурной нестабильностью твердого раствора аустенита в стали 10X13Г18Д при нагреве (даже кратковременном) выше температуры 1200...1250 °С. В то же время из рис. 4 видно, что там, где технологический шов (состав которого соответствует стали 10X13Г18Д, литое состояние) пересекает основной (выполнен с использованием проволоки Св-08Х20Н9Г7), ЗС не наблюдается. Обнаруженные особенности свидетельствуют о том, что под влиянием термометформационного цикла сварки при выполнении технологического валика в литом хромоникельмарганцевом аустенитоферритном шве изменений в фазовом составе не

происходит, в отличие от превращений $\gamma \rightarrow \gamma + \delta$ в металле ЗС со сталью 10X13Г18Д. Распределение микротвердости в металле поперек участков фазовой нестабильности (участки 1-1, 2-2 и 3-3 на рис. 4) приведены в табл. 3. При уменьшении нагрузки до 25 г HV 0,2 на участке скопления выделений δ -феррита составляет 203...258, а в матрице (твердом растворе аустенита) — 172...190.

Характерно, что при выполнении технологического валика обеспечивается снижение остаточных напряжений в сварных соединениях 10X13Г18Д+09Г2С вблизи зоны сварки (рис. 5).

Обсуждение экспериментальных данных. Между охрупчиванием сварных соединений стали 10X13Г18Д при эксплуатации и потерей прочностных свойств соединений при неблагоприятных условиях сварки может быть установлена, на наш взгляд, причинно-следственная связь. Металл холоднокатаного проката стали 10X13Г18Д в зависимости от исходного химического состава, режима аустенитизации, степени деформирования при прокатке, т. е. своей металлургической предыстории, приобретает различную степень метастабильности. Она проявляется как в формировании строчечных выделений δ -феррита в аустенитной матрице основного металла, так и в разбросе прочностных и пластических свойств проката, поступающего на ОАО «ХК «Лугансктепловоз». Так, согласно сертификатам на поставляемый лист σ_B в них колеблется в диапазоне 670...850, $\sigma_{0,2}$ — 390...430 МПа, а относительное

Таблица 3. Распределение микротвердости (HV 0,5) поперек участков фазовой нестабильности

Участок замера микротвердости (рис. 4)	Шов		ЗС	Основной металл	Строчечное выделение
	основной	технологический			
1-1	—	232...260	216...241	232...241	—
2-2	229...280	—	232...274	221...244	—
3-3	—	—	—	232...234	171...183

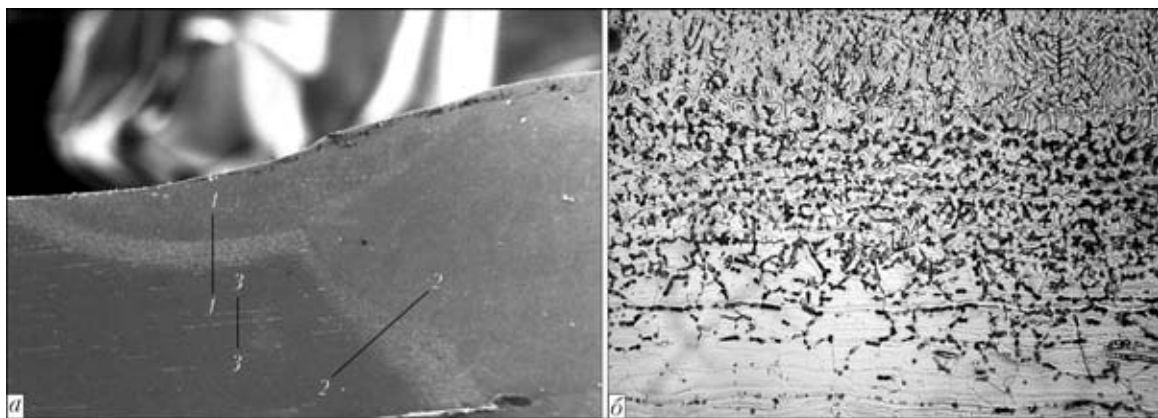


Рис. 4. Макроструктура фрагмента сварного соединения 10X13Г18Д+09Г2С с основным швом и технологическим валиком (а), $\times 60$ и микроструктура металла ЗС технологического валика со сталью 10X13Г18Д (б), $\times 500$: 1-1, 2-2, 3-3 — участки замера микротвердости

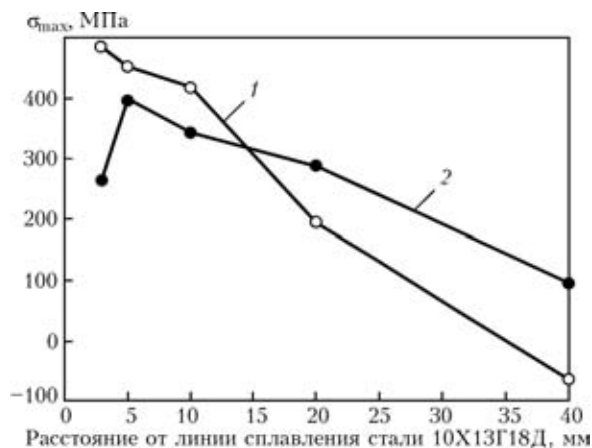


Рис. 5. Продольные напряжения в поперечном направлении нахлесточных сварных соединений 10X13G18D+09G2C после сварки (1) и после выполнения технологического валика (2)

удлинение δ_5 — 54...64 %. В условиях дуговой сварки даже при кратковременном нагреве стали выше температуры 1200...1250 °C активно протекает фазовое превращение $\gamma \rightarrow \gamma + \delta$ за счет диффузионного характера перераспределения химических элементов и прежде всего хрома. В результате наблюдается стабильное существование второй фазы (δ -феррита). Появление δ -феррита в аустенитной основе, особенно в количестве 2...8 об. %, обычно не сказывается на физико-механических свойствах металла. Более того, наличие δ -феррита в аустенитной структуре металла шва резко подавляет возможность появления в нем горячих трещин [8], что собственно и достигается использованием проволоки Св-08X20Н9Г7 при сварке стали 10X13G18D и ее соединений со сталью 09G2C. Однако появление δ -феррита в металле ЗС соединений стали 10X13G18D имеет определенную специфику. Так как прочностные свойства стали 10X13G18D в литом состоянии (металл технологического шва) и металла шва, полученного с использованием проволоки Св-08X20Н9Г7, ниже, чем у деформированного проката стали 10X13G18D, то появление δ -феррита в металле ЗС говорит о процессе разупрочнения металла проката и релаксации в нем напряжений.

Снижение удельного тепловложения при сварке, либо использование других (например, технологических) приемов сокращения времени пребывания металла в перегретом состоянии будет способствовать сохранению фазовой стабильности основного металла в ЗС со швом и соответственно сохранению более высоких прочностных свойств. Это относится также и к плас-

тическим свойствам металла ЗС соединений. Напротив, появление δ -феррита и связанное с ним перераспределение хрома в структуре металла ЗС может сопровождаться появлением микрохимической неоднородности (обеднение хромом приграничных участков зерен аустенита, прилегающих к зернам δ -феррита). Последнее может провоцировать нарушение стабильности аустенита в этих участках зерен и приводить к появлению вторичного мартенсита, способного снизить пластические свойства металла в этой зоне.

Выводы

1. Установлено, что холоднокатаный прокат в виде листа из стали 10X13G18D характеризуется метастабильным состоянием.
2. Под влиянием высокотемпературного (выше 1200...1250 °C) нагрева в ЗС стали 10X13G18D наблюдается выделение δ -феррита, сопровождаемое разупрочнением металла в этой зоне.
3. Ограничение удельного тепловложения при сварке и сокращение времени перегрева стали повышает физико-механические свойства сварных соединений.
4. Выдвинуты предположения о причинно-следственной связи между свойствами ЗС соединений после сварки и эксплуатационными свойствами сварных конструкций.

1. Ульянин Е. А. Коррозионностойкие стали и сплавы. — М.: Металлургия, 1991. — 256 с.
2. Ткаченко А. Н., Гедрович А. И., Гальцов И. А. Применение метастабильной коррозионностойкой стали 10X13G18D в качестве обшивки вагонов электро- и дизельпоездов // Материалы междунар. конф. «Сварка и родственные технологии 2002». — Киев: НТК ИЭС им. Е. О. Патона, 22–26 апр. 2002. — С. 56–57.
3. Гальцов И. А. Повышение качества металлоконструкций из аустенитной метастабильной стали 10X13G18D путем сварки с принудительным охлаждением: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Мариуполь, 2005. — 20 с.
4. Справочник сварщика / Ю. А. Денисов, Г. Н. Коченева, Ю. А. Маслов и др.; Под ред. В. В. Степанова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1982. — 560 с.
5. Оперативное определение остаточных напряжений с использованием электронной спекл-интерферометрии / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, В. В. Савицкий и др. // В мире неразрушающего контроля. — 2005. — № 1. — С. 10–13.
6. Дуговая сварка с импульсной подачей электродной проволоки — процесс СМТ, предложенный фирмой «Фрониус» // Автомат. сварка. — 2004. — № 12. — С. 55–58.
7. Экономичность прежде всего // Weld+Vision. — 2006. — С. 16–17.
8. Медовар Б. И. Сварка аустенитных сталей и сплавов. — Киев: Техніка, 1966.

Peculiarities of the reaction of austenitic steel 10Kh13G18D in the form of cold-rolled stock to the thermal-deformation cycle of arc welding are considered. The character of phase transformations in the zone of fusion of steel 10Kh13G18D in similar and dissimilar joints with steel 09G2S is shown. Decrease in welding heat input prevents to a considerable degree the weakening of metal within the fusion zone of welded joints and reduces the probability of precipitation of δ -ferrite in this zone.

Поступила в редакцию 18.01.2007



ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ СВАРКИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРУШЕНИЮ МЕТАЛЛА ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЫ В СОЕДИНЕНИЯХ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В96цс

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

Исследовано влияние объемного содержания, морфологии и химического состава частиц, содержащих цирконий и скандий, на характеристики сопротивления разрушению металла зоны термического влияния высокопрочного сложнелегированного алюминиевого сплава В96цс при дуговой сварке плавлением и электронным лучом.

Ключевые слова: дуговая и электронно-лучевая сварка, алюминиевый сплав, сварочный нагрев, неплавящийся электрод, электронный луч, зона термического влияния, структура, объемная доля частиц, сопротивление разрушению

Сплав В96цс системы легирования Al–Zn–Mg–Cu является новой модификацией сплава В96 и характеризуется высокими значениями механических свойств [1–3]. Высокая удельная прочность, характерная для сплавов этой системы легирования, позволяет использовать их для обшивок и деталей силового набора планера (поясов лонжеронов). В основном это клепаные соединения конструктивных элементов, поскольку данные сплавы трудно свариваются.

Наличие в составе сплавов циркония и скандия повышает температуру рекристаллизации алюминия, ускоряет распад твердого раствора в процессе последующих термических операций с образованием тонкодисперсных частиц интерметаллидных фаз [4–6]. Они не только упрочняют сплав, но и препятствуют протеканию рекристаллизации в процессе сварочного нагрева. Такие неметаллические включения (НВ) располагаются вдоль границ и по объему зерен. В процессе сварки данные фазы коагулируются, что оказывает влияние на свойства сварных соединений [7].

Известно, что наличие грубых фаз, которые располагаются вдоль границ зерен, снижает пластичность, вязкость разрушения, сопротивление развитию трещин в условиях эксплуатации [8–11]. Они также являются очагами зарождения трещин при разрушении конструкционных материалов независимо от формы (пластинчатой, игольчатой и др.) частицы. Все это создает необходимость тщательного учета размеров и количества фаз в условиях сварочного нагрева, поскольку количество НВ является одним из важнейших показателей качества металлов и их сварных соединений, от ко-

торого зависят свойства и эксплуатационная надежность.

Для изучения структурных процессов, протекающих в металле при сварке, были выбраны термические условия двух способов соединения алюминиевых сплавов, широко используемых при изготовлении легких конструкций — дугой неплавящегося электрода (СНЭ) и электронным лучом (ЭЛС). Для моделирования условий охлаждения образцов при сварке (10...20 и 30...50 °С/с) использовали соответственно воздушную и водную среду [12].

Механические испытания образцов проводили при внецентренном растяжении, когда на металл одновременно действует одноосное растяжение и изгиб. Испытания моделировали работу типовых элементов конструкции и отвечали техническим требованиям ГОСТ 25.506. Эксперименты проводили с использованием универсальной машины РУ-5, что позволило, помимо изучения структуры металла ЗТВ сварного соединения, определить характеристики сопротивления разрушению отдельных его участков и по их результатам установить влияние характера распределения частиц, содержащих цирконий и скандий, их объемную долю на условия и параметры зарождения и распространения трещин. Измерения микротвердости исследуемых образцов выполняли от вершины надреза вдоль линии распространения магистральной трещины (табл. 1).

Количественную оценку объемной доли частиц в структуре исследуемого сплава В96цс проводили с помощью компьютерной программы ImagePro 30, которая позволяет выделять характерные элементы структуры на основании цветового контраста. Последующую математическую обработку осуществляли с помощью программы Statistica 5.0. По полученным результатам построены графические зависимости влияния объемной доли НВ



Таблица 1. Изменение объемной доли НВ, %, в сплаве В96с после термообработки с учетом расстояния от вершины надреза

Расстояние от вершины надреза, мм	Вид термообработки							
	Перегрев	Закалка (вода)	Закалка (воздух)	Отжиг (вода)	Отжиг (воздух)	Отпуск	Старение	Исходное состояние
0	2,19	1,12	3,96	3,84	6,77	1,70	1,37	1,49
3	2,42	1,72	5,45	4,84	3,56	2,37	2,35	1,03
6	2,12	1,22	3,62	3,94	3,59	2,68	2,84	1,32
9	1,94	2,35	2,94	4,64	5,04	3,10	2,32	2,19

на физико-механические свойства структур, характерных для различных участков металла в ЗТВ. Для структурного анализа частиц, выделяющихся при сварочном нагреве и охлаждении, а также особенностей рельефа излома использовали растровый электронный микроскоп JSM-840.

Анализ данных табл. 1 показывает, что распределение объемной доли НВ в образцах исследуемого сплава в условиях перегрева, имитирующего состояние металла в зоне сплавления, неравномерно зависит от расстояния от вершины надреза. Объемная доля НВ в состоянии перегрева (550 °С, 3 с) сплава В96с составляет 1,94...2,42 %, т. е. их разброс 20 %.

Нагрев сплава до состояния закалки (460 °С, 1 ч) с последующим охлаждением в воде увеличивает разброс до 30 %. Количество объемной доли НВ при этом несколько снижается и составляет 1,12...1,72 %. Охлаждение образца от температуры закалки на воздухе приводит к увеличению объемной доли НВ в 2 раза. Аналогичные явления наблюдаются в сплаве и при нагреве до состояния отжига (360 °С, 20 мин), однако объемная доля НВ выше в 2...2,5 раза по сравнению с состоянием металла после закалки. В состоянии отпуска и старения ее значение снижается 1,5...3 раза, достигая предельных значений соответственно 1,7...3,10 и 1,37...2,84 %. Таким образом, установленные закономерности изменения объемной доли НВ в сплаве В96с от температуры сварочного нагрева показывают, что по сравнению с исходным состоянием основного металла наибольшее количество фаз выделяется на участке околошовной зоны, в которой реализуются условия отжига.

Рассматривая характер изменения объемной доли НВ в зависимости от расстояния от вершины надреза для двух исследуемых способов сварки (рис. 1), можно заметить, что их выделения в металле более неоднородны в условиях отжига, который происходит в металле ЗТВ при СНЭ. Максимальные значения объемной доли НВ (6,77 %) наблюдались в структуре исследуемого сплава на участке образца вблизи надреза. Аналогичное их расположение установлено после закалочного нагрева. В условиях, моделирующих ЭЛС, распределение фаз в сплаве В96с более равномерно и

разброс не превышает 15 %. При этом в образце вблизи надреза отмечается меньшая объемная доля НВ — 4,1 %. При других состояниях металла (отпуск, старение) этот показатель изменяется в пределах 0,5...3 %. Участки с максимальным их содержанием могут быть потенциальными зонами снижения сопротивления зарождению и распространению трещин при статическом нагружении. Поскольку обычно шов располагается параллельно долевого направлению проката полуфабриката, то на первом этапе исследования была использована указанная выше методика.

Перераспределение растворенных атомов легирующих элементов и примесей, которое происходит в металле при термическом воздействии сварки, приводит к выделению частиц НВ как в объеме зерен, так и по их границам [7]. Характер протекания процесса зависит от температуры на-

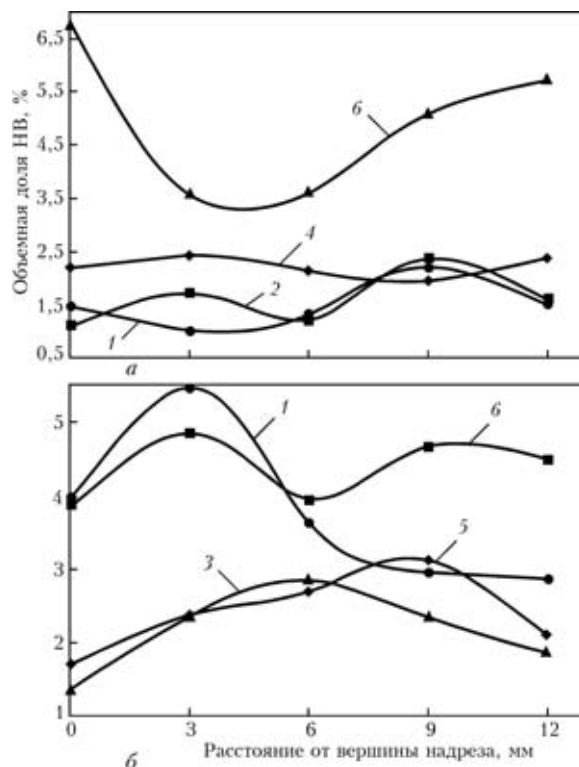


Рис. 1. Изменение объемной доли НВ в сплаве В96с при СНЭ (а) и ЭЛС (б) с учетом расстояния от вершины надреза: 1 — перегрев; 2, 3 — закалка с охлаждением соответственно на воздухе и в воде; 4, 5 — отжиг с охлаждением соответственно на воздухе и в воде; 6 — отпуск

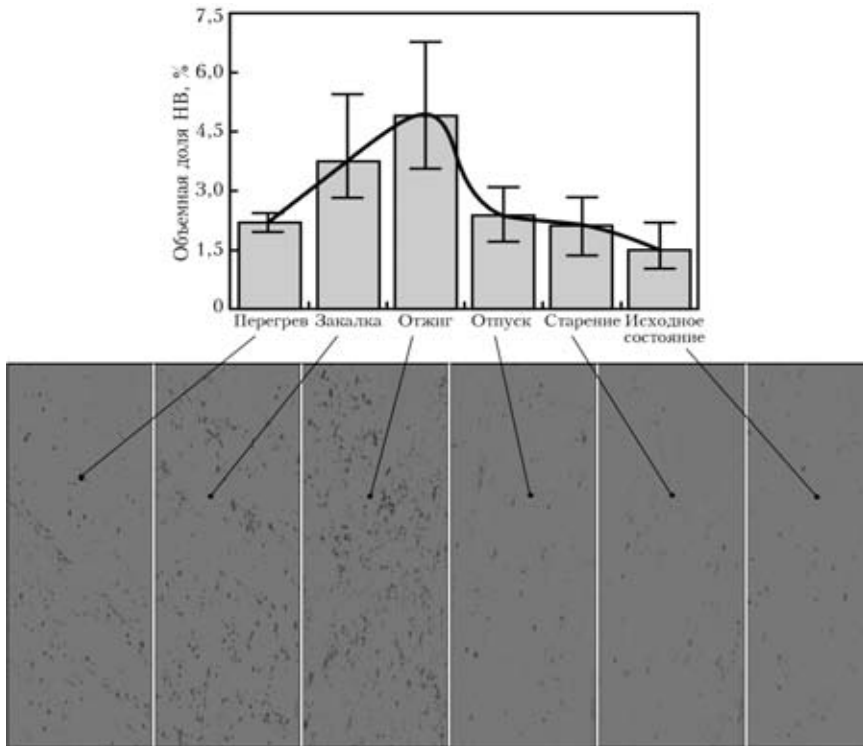


Рис. 2. Влияние термических условий, протекающих при СНЭ сплава В96цс, на объемную долю НВ и характер их выделения вдоль направления проката

грева и скорости охлаждения. В условиях закалки, когда, кроме выделения частиц, параллельно происходит их растворение, отмечается образование меньшей объемной доли НВ (от 3 до 6 %), особенно в случае высокой скорости охлаждения, присущей ЭЛС. В условиях отжига, когда частицы НВ не только выделяются, но и коагулируются, скорость охлаждения металла оказывает влияние только на разброс их объемной доли.

Сопоставив полученные уровни объемной доли НВ, выделяющихся при сварочном нагреве и охлаждении (рис. 2), установлена ее зависимость от скорости охлаждения. Высокая скорость охлаждения (30...50 °С/с) сплава В96цс, сопровождающая ЭЛС, приводит к образованию небольшой объемной доли выделяющихся фаз после закалки и отжига. При охлаждении образцов в воде до температуры закалки объемная доля НВ неоднородна и изменяется в пределах 1,12...2,2 % (см. табл. 1). В условиях воздушного охлаждения ее значение возрастает в 4 раза (рис. 3). При этом повышается как минимальный уровень объемной доли НВ (2,85), так и максимальный (5,45 %). Нагрев образцов исследуемого сплава В96цс до температуры отжига приводит к изменению

наблюдаемых зависимостей. Нижние пределы значения объемной доли НВ совпадают и составляют 4 %, а максимальные определяются скоростью охлаждения. При ее увеличении продолжительность процесса распада твердого раствора сокращается, что способствует снижению в 1,5 раза объемной доли НВ в исследуемом сплаве.

Как видно из данных, представленных на рис. 2, 3, продолжительность термического цикла сварки оказывает влияние не только на объемную

долю НВ, но и на характер распределения частиц. Более высокая скорость охлаждения при ЭЛС обеспечивает дисперсность и однородность выделения частиц. Тем не менее нельзя не заметить и некоторое подобие характера изменения кривых распределения НВ в структуре металла ЗТВ. В обоих случаях участок сварного соединения, нагретый до состояния отжига, может быть потенциальным местом снижения уровня вязкости и пластичности по сравнению с другими участками ЗТВ. Наибольшая объемная доля (6,77 %) выделившихся частиц наблюдается на участке отжига ($T = 360\text{ }^{\circ}\text{C}$, 20 мин) при СНЭ. В условиях, моделирующих нагрев металла

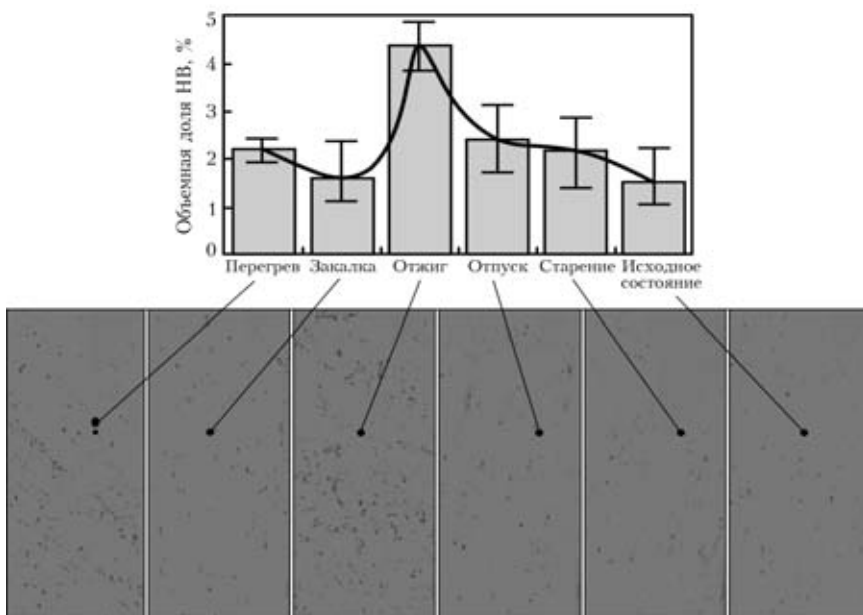


Рис. 3. Влияние термических условий, протекающих при ЭЛС сплава В96цс, на объемную долю НВ и характер их выделения вдоль направления проката

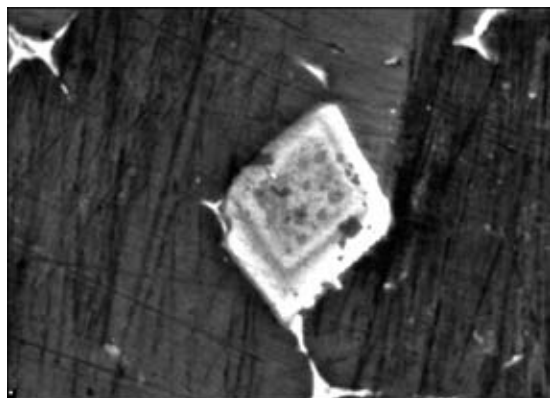


Рис. 4. Nb в сплаве В96бс, обогащенные цирконием и скандием (X3000)

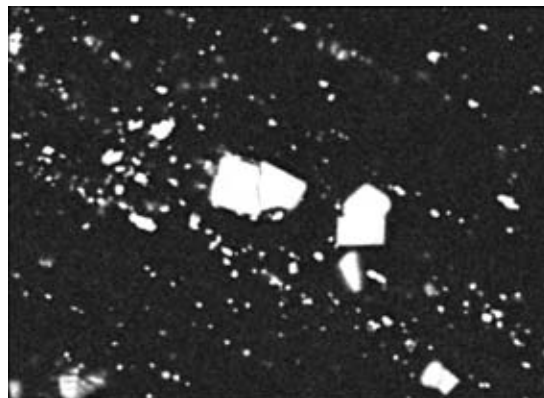


Рис. 5. Nb в сплаве В96бс, обогащенные медью, цинком и магнием (X1000)

при ЭЛС, объемная доля частиц вдвое меньше и составляет примерно 5 %. По сравнению с исходным состоянием сплава (1,5 %) полученные значения количества Nb в 4,5 и 2,5 раз выше.

При исследовании морфологии расположения частиц установлено, что под действием сварочного нагрева в сплаве имеют место выделения двух типов. Используемая в работе компьютерная методика определения объемной доли Nb, содержащихся в образцах, не позволила их идентифицировать, что связано с недостаточным разрешением программы ImagePro по цветовому контрасту. Тем не менее при исследовании изломов разрушенных при внецентренном растяжении образцов обнаружены также два типа Nb. К первому можно отнести Nb, имеющие правильную геометрическую форму и комплексное строение (рис. 4). В структуре они расположены неравномерно. Размер включений составляет 10...20 мкм. На первом этапе пластической деформации в условиях внецентренного растяжения они расслаиваются, образуя тем самым микротрещины. Последующая деформация металла приводит к подрастанию трещины и обуславливает ее выход на границу между зернами. Изучив химический состав отдельных расслоений частиц, установлено, что они содержат циркония и скандия соответственно 24...27 и 15...17 %. Их микротвердость значительно выше, чем матрицы, содержание циркония и скандия в которой составляет соответственно лишь 0,2 и 0,5 %. Ко второму типу фазовых включений можно отнести частицы, имеющие более округлую форму и на порядок меньшие размеры (рис. 5). Содержание основных легирующих элементов в них следующее, %: 26...28 Cu, 38...40 Zn, 11...14 Mg. Средняя протяженность таких частиц составляет 3...5 мкм, ширина 2...3 мкм. Располагаются они в виде скоплений преимущественно вдоль границ зерен, ориентированных в направлении проката.

Для понимания особенностей выделения частиц в металле ЗТВ под действием сварочного нагрева на втором этапе исследования дополнительно

изучены образцы, вырезанные в поперечном сечении относительно направления проката. Согласно полученным результатам характер распределения частиц, выделяющихся в металле в процессе нагрева, зависит от ориентации образца относительно направления проката (продольное или поперечное направление). При ЭЛС наибольшее значение выделений наблюдается в образце, который в состоянии перегрева имитирует зону сплавления шва с основным металлом (рис. 6). Затем кривая изменения объемной доли Nb резко снижается до 1,3 %, что обусловлено образованием при температуре нагрева ниже 500 °С комплексных соединений, содержащих добавки циркония и скандия. В других исследуемых участках околошовной зоны объемная доля Nb монотонно снижается,

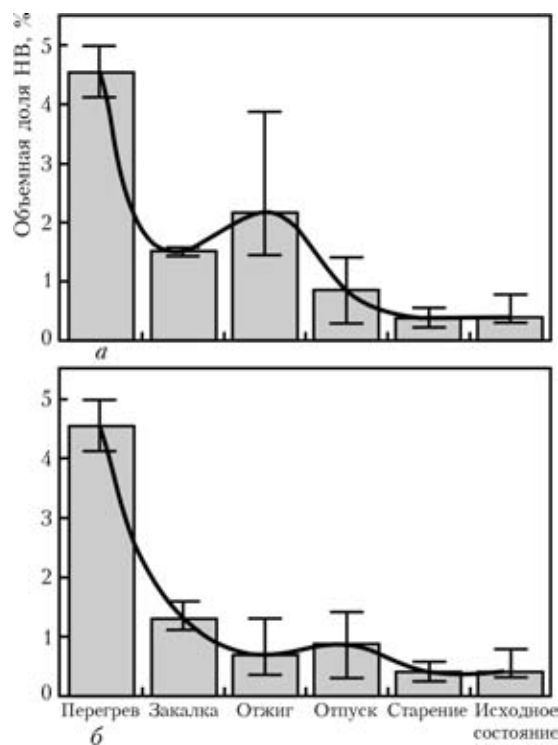


Рис. 6. Влияние термических условий, протекающих при СНЭ сплава В96бс (а) и ЭЛС (б), на объемную долю фаз и особенности их выделения поперек направления проката

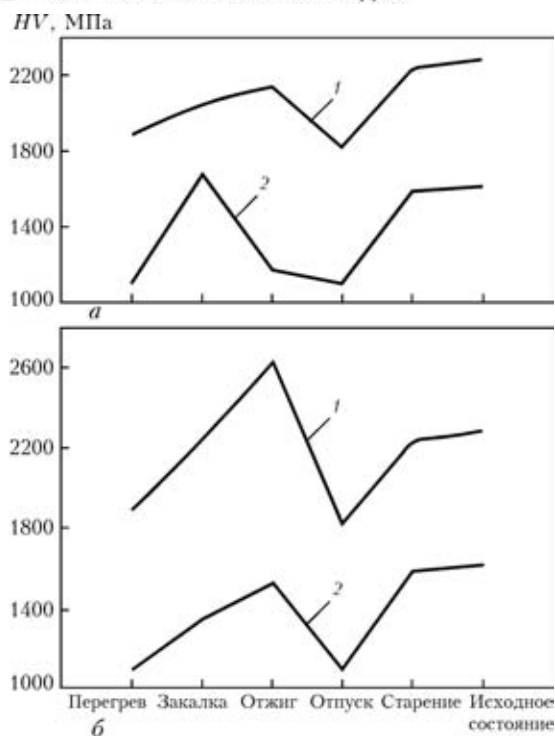


Рис. 7. Характер изменения микротвердости частиц, обогащенных цирконием и скандием (1), и матрицы (2) в зависимости от температурных условий ЗТВ при СНЭ (а) и ЭЛС (б)

что связано с продолжительностью термического цикла сварки (нагрева и охлаждения).

В условиях СНЭ при выделении частиц в исследуемых образцах наблюдается два максимума изменения закономерностей. Первый — состояние перегрева, второй — отжига. Наличие второго максимума, который ниже на 2,17 %, чем первый, можно объяснить гетерогенным зарождением и ростом частиц избыточных фаз в условиях отжига. Рассматривая микроструктуру выделений при отжиге, отчетливо виден результат их коагуляции по сравнению с состоянием перегрева и закалки, что, возможно, способствует увеличению объемной доли фаз. По сравнению с условиями ЭЛС при СНЭ создаются предпосылки для охрупчивания межзеренного промежутка, что влияет на зарождение трещины на этом участке сварного соединения.

Сравнив характер распределения выделяющихся при сварочном нагреве частиц в околошовной зоне, обнаружены отличия их форм и размеров. В долевом направлении они вытянуты вдоль проката, в поперечном сечении имеют более округлую форму, неоднородны и имеют комплексный состав. Согласно данным, полученным методом цветового контраста, который отображает различие фаз по химическому составу, можно выделить пять типов НВ. Их размер после нагрева по режиму СНЭ составляет от 2,5 до 7,8 мкм, что в 1,5...2 раза больше, чем при использовании ЭЛС (1,7...4,9 мкм). Пять видов включений наблюдается в основном металле, а также на участке

Таблица 2. Характеристики вязкости разрушения соединений сплава В96цс в различных участках околошовной зоны в зависимости от условий сварочного нагрева

Условия нагрева	σ_p , МПа	K_{IC} , МПа $\sqrt{м}$	J_{IC} , Дж/см 2	УРРТ $_2$, Дж/см 2
Перегрев (ЗС) 550 °С, 3 с	389	46,81	4,8	10,0
Закалка 460 °С, 1 ч	456/397	32,02/24,19	3,5/1,9	4,8/6,6
Отжиг 360 °С, 20 мин	389/152	46,81/18,1	3,8/1,1	10,0/3,4
Отпуск 360 °С, 3 мин	371	32,02	3,24	6,6
Старение 140 °С, 7 ч	211	17,69	1,1	3,3
Основной металл	245	17,23	1,1	3,2

Примечание. В числителе приведены результаты испытаний после нагрева и охлаждения в воде, моделирующие условия ЭЛС, в знаменателе — условия СНЭ.

околошовной зоны, где происходит старение. На других участках термического влияния отмечается три или четыре типа НВ. Такие отличия в разновидностях выделившихся при нагреве частиц обусловлены температурно-временными параметрами теплофизических условий сварки.

Как видно из рис. 7, микротвердость включений, содержащих цирконий и скандий, в 1,5 раза выше, чем матрицы, что может быть свидетельством их большей хрупкости. При испытаниях в условиях растяжения именно эти частицы являются очагами зарождения микротрещин. Установлена зависимость уровня микротвердости матрицы и исследуемых частиц в зависимости от состояния структуры, присущей отдельным участкам металла ЗТВ. Наименьшие значения микротвердости матрицы сплава В96цс наблюдаются в состоянии перегрева, который моделирует линию сплавления шва с основным металлом.

Второй зоной снижения микротвердости является участок соединения, при котором сплав в условиях сварки находится в состоянии отпуска ($T = 360$ °С, 3 мин). Очевидно, этому способствует специфический характер фазовых превращений вследствие малой продолжительности воздействия температуры сварочного цикла на металл. Обнаруженные зоны резкого снижения уровня прочности сплава В96цс вследствие нагрева выступают потенциальными участками ограничения сопротивления металла действию внешней нагрузки, что может в условиях эксплуатации обусловить процесс зарождения трещин. Согласно данным показателей вязкости разрушения, представленным табл. 2, они снижаются с увеличением объемной доли частиц при сварочном нагреве. Ограничивающая способность сплава В96цс пластически деформироваться, грубые выделения, располо-



женные вдоль границ зерен, облегчают зарождение и распространение трещины, на что указывает резкое снижение уровня показателей вязкости разрушения.

Как видно из табл. 2, практически все показатели сопротивления разрушению зависят от теплофизических условий нагрева и охлаждения. Наибольшее влияние скорость охлаждения при сварке оказывает на энергию зарождения трещины J_C , которая уменьшается при охлаждении в воде на 15 %, а на воздухе — более чем в 2...3 раза. При этом также снижается удельная работа распространения трещины (УРРТ).

Подобная закономерность отмечается и у критического коэффициента интенсивности напряжения K_C , особенно после нагрева до температуры отжига. Значение K_C в этом случае уменьшается более чем в 3 раза. Изменения структуры, происходящие при искусственном старении сплава В96с, обеспечивают прирост значений σ_p на 20 %, однако другие показатели вязкости разрушения (K_C , J_C , УРРТ) при этом характеризуются более низкими значениями — 17,69 МПа $\sqrt{м}$, 1,1 и 3,1 Дж/см² соответственно.

Таким образом, изменение уровня показателей зарождения и распространения трещин при разрушении сплава В96с в околошовной зоне зависит от теплофизических условий, сопровождающих сварочный процесс. Увеличение объемной доли частиц, структурные и фазовые изменения, происходящие вследствие термического цикла сварки, вызывают неоднородное напряжен-

ное состояние в сплаве и связанный с ним механизм разрушения соединений, что свидетельствует об определяющей роли объемной доли частиц, в том числе и с модификаторами (цирконием и скандием) на характер зарождения трещин при разрушении сплава В96с и его сварных соединений.

1. Фридляндер И. Н. Аллюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970–2000 и 2001–2015 гг. // *Технология легких сплавов*. — 2002. — № 4. — С. 12–17.
2. Фридляндер И. Н., Белецкий В. М., Кривов Г. А. Аллюминиевые сплавы в авиационных конструкциях // *Технологические системы*. — 2000. — № 1. — С. 5–17.
3. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства аллюминиевых сплавов. — М.: *Металлургия*, 1979. — 639 с.
4. Ищенко А. Я., Лабур Т. М. Свариваемые аллюминиевые сплавы со скандием. — Киев: МИИВЦ, 1999. — 114 с.
5. Рабкин Д. М. *Металлургия сварки плавлением аллюминия и его сплавов*. — Киев: *Наук. думка*, 1986. — 256 с.
6. Фудзивара Т. Технологии соединения легких металлов в авиационной и космической технике // *Кэйкиндзоку эсэцу*. — 2001. — 39, № 3. — С. 1–11.
7. Ищенко А. Я., Склабинская И. Е. Особенности превращений в зоне термического влияния при сварке некоторых высокопрочных аллюминиевых сплавов // *Автомат. сварка*. — 1979. — № 5. — С. 26–29.
8. Брок Д. *Основы механики разрушения* / Пер. с англ. — М.: *Вышш. шк.*, 1980. — 368 с.
9. Владимиров В. И. *Физическая природа разрушения металлов*. — М.: *Металлургия*, 1984. — 280 с.
10. Ботвина Л. Р. *Кинетика разрушения конструкционных материалов*. — М.: *Наука*, 1989. — 230 с.
11. Кишкина С. И. *Сопротивление разрушению аллюминиевых сплавов*. — М.: *Металлургия*, 1981. — 280 с.
12. *Влияние структурных превращений при сварке аллюминиевого сплава В96 на параметры сопротивления разрушению* / Т. М. Лабур, Т. Г. Таранова, В. А. Костин и др. // *Автомат. сварка*. — 2006. — № 11. — С. 22–26.

Considered is the influence of volume fraction, morphology and composition of particles contained in zirconium and scandium on fracture resistance characteristics of the HAZ metal of a high-strength complex-alloyed aluminium alloy V96tss in fusion arc and electron beam welding

Поступила в редакцию 01.02.2006



4-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО СВАРОЧНЫМ МАТЕРИАЛАМ

Разработка, технология, производство, качество

18–21 июля 2007 г.

пос. Агой Тихорецкий р-н
Краснодарский край

Организаторы:

Ассоциация «Электрод» предприятий СНГ

Научно-производственный центр «Сварочные материалы»

При поддержке:

Межгосударственного научного совета по сварке и родственным технологиям
Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Российского научно-технического сварочного общества
Общества сварщиков Украины

Контактный тел./факс: (38044) 287-72-35



ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ПГВ-1000М

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **О. В. МАХНЕНКО**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
О. Я. ЗИНЧЕНКО, инж. (ГП НАЭК «Энергоатом», г. Киев)

С ростом избыточного давления при пневмогидравлическом аквариумном способе контроля герметичности парогенераторов ПГВ-1000М происходит увеличение зазора между теплообменной трубкой и стенкой коллектора. В результате в вершине зазора (корне сварного шва) возникают дополнительные напряжения, которые могут приводить к нарушению целостности по механизму страгивания трещинообразного конструктивного дефекта. Дана оценка риска появления разрушения при росте избыточного давления.

Ключевые слова: теплообменные трубки, сварные соединения, остаточные напряжения, расчет, риск разрушения, работоспособность соединений

В настоящее время пневмогидравлический аквариумный контроль герметичности парогенераторов ПГВ-1000М является наиболее эффективным способом обнаружения протечек в теплообменных трубках (ТОТ) и сварных соединениях их торцов с коллектором [1]. При этом способе контроля герметичности во втором контуре ПГВ-1000М (рис. 1) создается избыточное давление воздуха в корпусе парогенератора при условии, что коллектор залит до определенного уровня водой (первый контур).

При наличии дефектов герметичности протечек в трубках либо сварных соединениях (рис. 2) пузырьки воздуха выделяются в воду первого контура в районе соответствующих трубок горячего либо холодного коллектора, что фиксируется средствами наблюдения. При испытании на герметичность по частоте выделения пузырьков воздуха в районе данной трубки, зависящей от избыточного давления воздуха, определяют протечку Q теплоносителя (питательной воды) в районе данной трубки при избыточном давлении $P = 10$ МПа между первым и вторым контуром (рис. 3), допускаемое значение которой составляет $Q = 2$ л/ч.

Из рис. 3 видно, что увеличение давления значительно сокращает время испытания, поскольку сокращает время τ между образованием смежных пузырьков. Так, при $Q = 2$ л/ч τ уменьшается от 500 (при $P = 0,1$ МПа) до 7 с (при $P = 2,0$ МПа). Учитывая тот факт, что контролю подлежат приблизительно 11 000 трубок в каждом контуре ПГВ-1000М, то указанное выше приобретает большое значение.

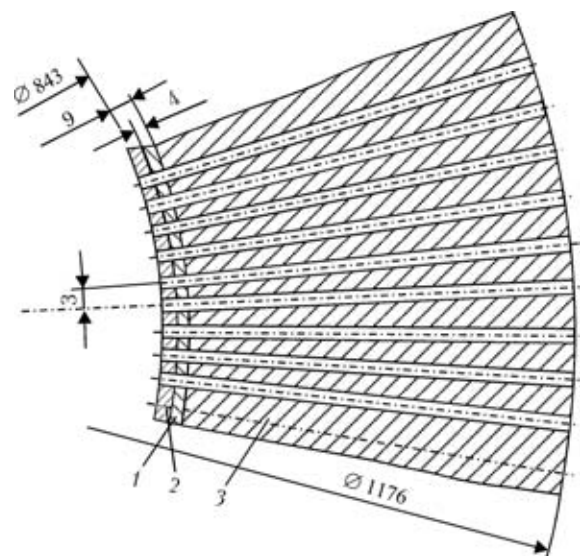


Рис. 1. Схема монтажа ТОТ в корпусе коллектора ПГВ-1000М: 1 — первый наплавленный слой из стали 07Х25Н10; 2 — второй наплавленный слой из стали 04Х20Н10; 3 — основной металл — сталь 10ГН2МФА

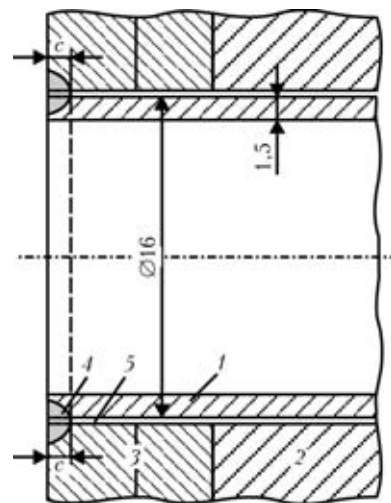


Рис. 2. Схема сварных соединений ТОТ с коллектором: 1 — ТОТ; 2 — стенка коллектора; 3 — аустенитная наплавка; 4 — сварной шов; 5 — зазор между ТОТ и коллектором

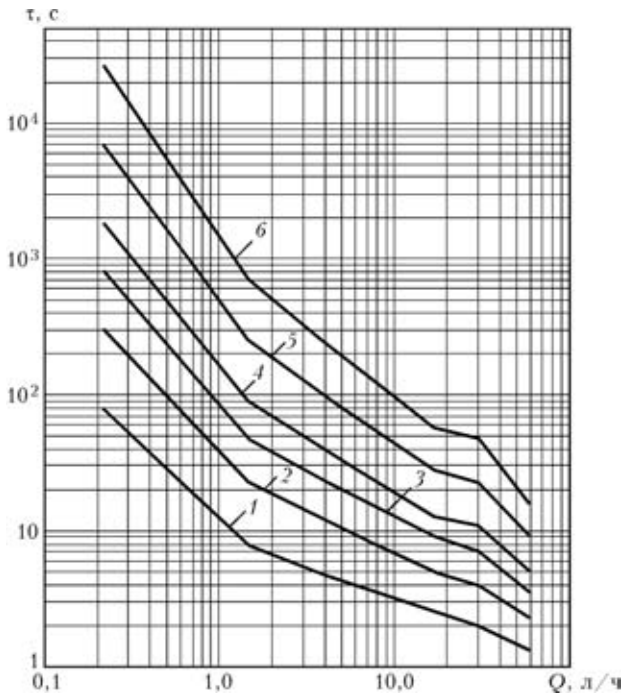


Рис. 3. Зависимость времени выдержки τ парогенератора при испытаниях под избыточным давлением воздуха P (0,1...2 МПа) от протечки Q теплоносителя: 1 — 2; 2 — 1; 3 — 0,6; 4 — 0,4; 5 — 0,2; 6 — 0,1 МПа

Повышение избыточного давления со стороны второго контура в парогенераторе способствует увеличению зазора (см. рис. 2) между ТОТ и стенкой коллектора, что приводит к образованию в вершине этого зазора (в корне сварного шва) дополнительных напряжений, которые при определенных условиях (остаточные напряжения в сварном шве, охрупчивание материала сварного шва, недостаточная глубина s проплавления или толщина перемычки) могут способствовать нарушению целостности по механизму страгивания трещинообразного конструктивного дефекта.

Оценке риска такого страгивания при увеличении избыточного давления P посвящена данная работа.

Постановка задачи. С определенной консервативностью можно принять на схеме рис. 2, что зазор представляет собой кольцевую трещину, где создается равномерное избыточное давление P , а на торце имеется кольцевая перемычка толщиной s , в которой действуют нерелаксированные радиальные остаточные напряжения σ_{rr}^{res} , способствующие при $\sigma_{rr}^{res} > 0$ нарушению целостности.

Для получения соответствующих количественных суждений о риске нарушения целостности в зависимости от P и остаточных нерелаксированных сварочных напряжений σ_{rr}^{res} используется критерий хрупко-вязкого разрушения [2] (процедура R6), применимость которого для материалов сварного соединения аустенитных сталей показана на рис. 4 [2], где кривая D соответствует экспери-

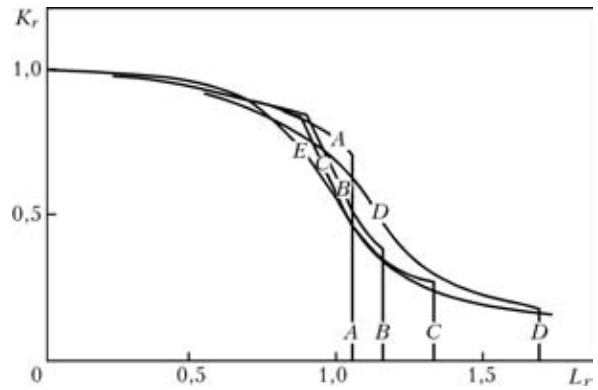


Рис. 4. Диаграммы предельного состояния $K_r = f(L_r)$ для конструкционных сталей разного типа [2]: A — высокопрочная сталь EN408; B — сталь для сосудов давления A533B; C — низкоуглеродистая сталь с марганцем; D — аустенитная; E — обобщенная кривая по [2]

ментальным данным, полученным для аустенитных сталей, кривая E — обобщенная зависимость $K_r = f(L_r)$:

$$K_r = (1 - 0,14L_r^2) [0,3 + 0,75 \exp(-0,65L_r^6)]$$

$$\text{при } L_r < L_r^{\max} = \frac{\sigma_T + \sigma_B}{2\sigma_T};$$

$$K_r(L_r) = 0 \text{ при } L_r > L_r^{\max},$$

(1)

где $K_r = K_I/K_{Ic}$; $L_r = \sigma_{ref}/\sigma_T$; K_I — коэффициент интенсивности напряжений для рассматриваемой трещины нормального отрыва, определяющий в сопоставлении с критическим значением для данного материала K_{Ic} риск чисто хрупкого разрушения; σ_{ref} — напряжение, обусловленное давлением P в зазоре и способное вызвать в перемычке толщиной s пластическую неустойчивость, которое определяет ее чисто вязкое разрушение в зависимости от P ; σ_T — предел текучести материала перемычки; σ_B — его временное сопротивление.

Для определения K_I в перемычке (сварном шве) толщиной s используем модель полуограниченной трещины в упругом полупространстве [3], когда перемычка находится под воздействием изгибающего момента M и усилия F :

$$K_I = 3,975 \frac{M}{c\sqrt{c}} + 7,044 \left(\frac{z_F}{c} - 0,368 \right) \frac{F}{\sqrt{\pi c}},$$

где z_F — расстояние от торца перемычки до линии действия усилия F . Величины M и F можно представить в следующем виде:

$$M = M_P + M_{res}; \quad F = F_P + F_{res}.$$

(3)

Здесь индекс P обозначает нагрузку от избыточного давления в полости между стенкой трубки и стенкой коллектора, а индекс res — от нерелаксированных остаточных напряжений.



Значения M_p и F_p можно определить как реакции в закрепленном торце длинной цилиндрической оболочки диаметром $2R$ с толщиной h стенки от внешнего избыточного давления P [4].

В этом случае при $z/c = 1$ по [4]

$$F_p = \frac{(1-\nu)P}{2\sqrt{3(1-\nu^2)}}\sqrt{Rh}; \quad M_p = \frac{(2-\nu)P}{4\sqrt{3(1-\nu^2)}}Rh \quad (4)$$

или при коэффициенте Пуассона $\nu = 0,3$

$$F_p = 0,52P\sqrt{Rh}; \quad M_p = 0,26PRh. \quad (5)$$

Для σ_{ref} можно использовать зависимость

$$\sigma_{ref} = \frac{F_p}{c} + \frac{4(M_p + F_p \frac{c}{2})}{c^2} = \frac{0,52P}{c} \left(3\sqrt{Rh} + \frac{2Rh}{c} \right). \quad (6)$$

Остаточные напряжения при определении значений σ_{ref} не учитываются, поскольку при вязком разрушении они успевают полностью релаксироваться.

Толщина перемычки c по техническим условиям приварки ТОТ для рассматриваемого случая должна составлять 1,5...1,0 мм. Однако после определенного срока эксплуатации она может уменьшиться за счет коррозии материала. При этом существует, по крайней мере, два типа механизма коррозионного уменьшения толщины перемычки c (рис. 5).

Первый тип повреждений происходит за счет коррозионно-эрозионного разрушения со стороны первого контура, либо за счет механизма развития трещин транскристаллитной (межкристаллитной) коррозии со стороны второго контура. Объективные условия для возникновения повреждений первого типа создаются по всей длине трубок, в том числе и на их торцах, особенно в горизонтальных парогенераторах [5].

Повреждения второго типа имеют место, если значения K_1 по (2) с учетом того, что в условиях эксплуатации перепад давления между вторым и первым контуром $\Delta P < 0$ (приблизительно -10 МПа),

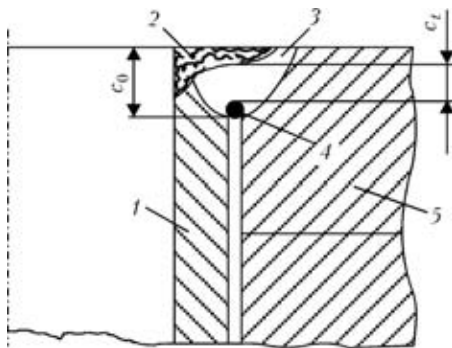


Рис. 5. Схема уменьшения толщины перемычки в процессе эксплуатации от c_0 до c_t ; 1 — ТОТ; 2 — зона коррозионно-эрозионного разрушения; 3 — сварной шов; 4 — зона межкристаллитного развития трещины под напряжением; 5 — стенка коллектора

будут намного больше нуля, а это возможно только при определенном значении нерелаксированных остаточных напряжений.

Таким образом, учет значений остаточных напряжений в зоне сварного соединения приварки трубок весьма важен для решения данной задачи.

Определение остаточных напряжений. Небольшие размеры зоны сварки при приварке ТОТ к стенке коллектора (см. рис. 2) затрудняют определение значений остаточных напряжений экспериментальными методами. По этому вопросу имеется весьма ограниченное количество публикаций [6 и др.]. Среди отраслевых официальных документов следует отметить отчет [7] о выполнении экспериментальных оценок остаточных напряжений в стенке ТОТ от приварки и вальцовки торца. На рис. 6 приведены соответствующие результаты из работы [7], достоверность которых по указанной выше причине весьма невысокая.

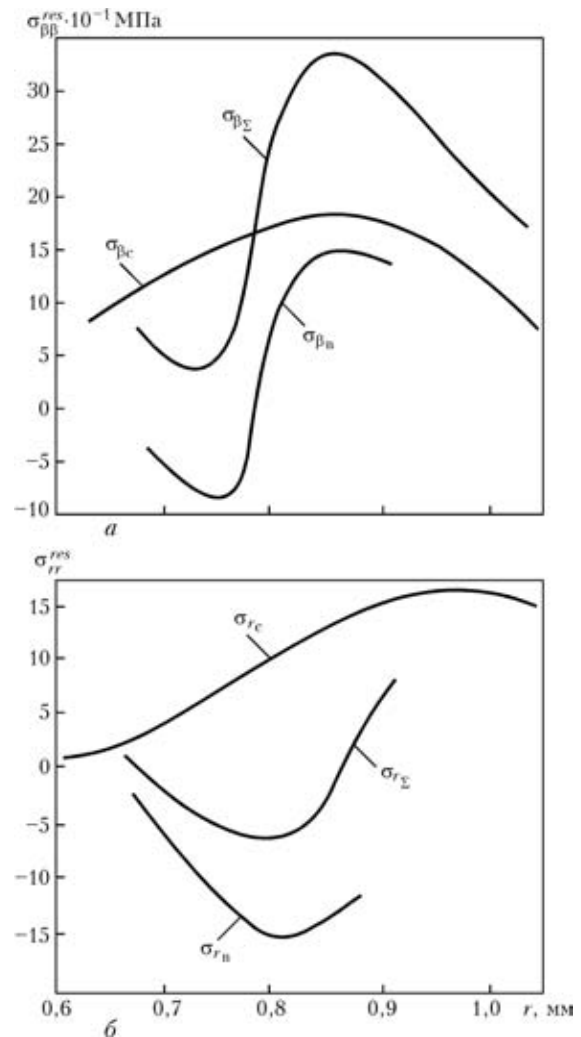


Рис. 6. Экспериментальные данные [7] измерения остаточных тангенциальных окружных σ_{β}^{res} (а) и радиальных σ_r^{res} (б) напряжений в стенке ТОТ, образовавшихся при сварке торца и вальцовки: индекс c обозначает после сварки; v — после вальцовки; Σ — суммарный; r — координата r

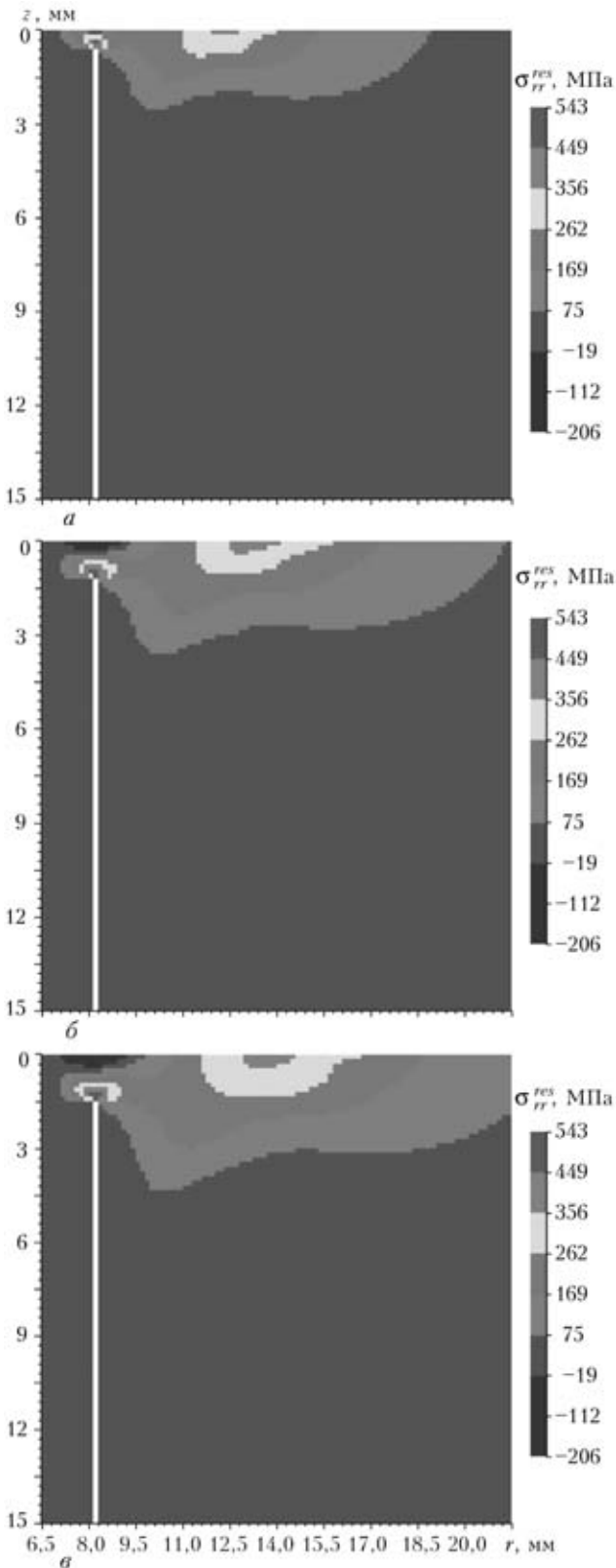


Рис. 7. Расчетное распределение остаточных радиальных напряжений σ_{rr}^{res} в сварном соединении при различной погонной энергии, обеспечивающих глубину проплавления $c = 0,45$ (а), $1,05$ (б) и $1,50$ мм (в)

В ИЭС им. Е. О. Патона в 2000 г. по заказу фирмы «Infacor GmbH» разработана расчетная методика определения напряженного состояния сварного узла приварки ТОТ к трубным доскам.

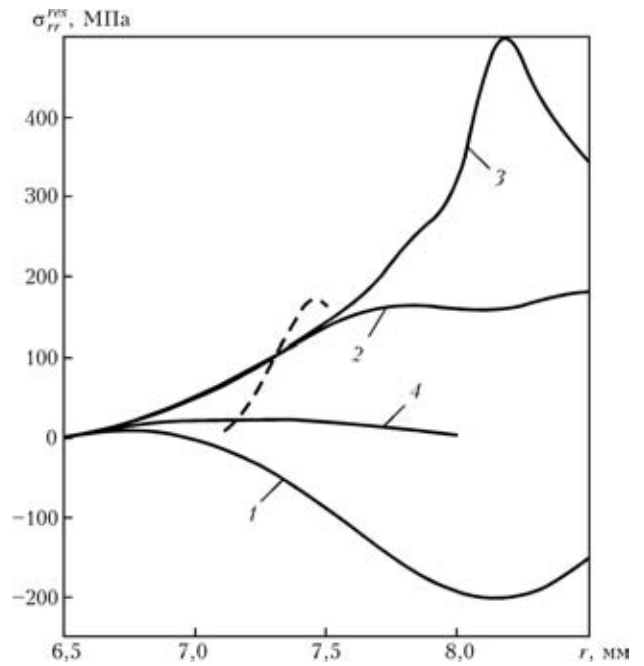


Рис. 8. Распределение остаточных сварочных напряжений σ_{rr}^{res} по толщине стенки трубки ($6,5 \leq r \leq 8,0$ мм) и трубной доски ($r > 8$ мм) при режимах сварки, обеспечивающих толщину перемычки $c = 1,05$ мм: сплошные кривые — результаты расчета в сечении $z = \text{const}$ (т. е. в плоскостях на различных расстояниях от торца трубки); штриховая — экспериментальные данные [7]: 1 — $z/c = 0$; 2 — $0,5$; 3 — $1,0$; 4 — $1,5$

Она основана на математическом моделировании кинетики термомеханических процессов, происходящих в зоне сварки трубки с трубной доской и адаптирована к различным материалам ТОТ и трубных досок, формам сварного соединения и пр. [6]. В настоящей работе указанная методика использована для получения остаточных напряжений в случае, рассматриваемом на рис. 2.

На рис. 7 приведено распределение остаточных напряжений σ_{rr}^{res} в зоне сварного соединения при различной погонной энергии процесса $q_{п}$, обеспечивающей глубину проплавления c от $0,45$ до $1,50$ мм. При таких условиях распределение остаточных напряжений после сварки происходит достаточно сложно, поскольку наличие свободных поверхностей (внутренняя поверхность трубок, зазор между трубкой и коллектором, торцевая поверхность) оказывает заметное влияние на распределение остаточных напряжений. В сечении $z = \text{const}$ (т. е. в плоскостях, расположенных на различных расстояниях от торца) распределение σ_{rr}^{res} по координате r имеет две экстремальные зоны — одна при $r = 8$ мм (поверхность трубки) и вторая при $r = 12...13$ мм (примерно середина расстояния между соседними трубками).

С увеличением z напряженное состояние резко затухает, и при $z = 4...5$ мм уровень остаточных напряжений в стенке коллектора уже незначителен.



Таблица 1. Результаты обработки данных рис. 8

Режим сварки	q_{II}^* , Дж/мм	c , мм	F_{res}^* , МПа·мм	M_{res}^* , МПа·мм ²	K_I^{res} , МПа·мм ^{1/2}	z_F/c
1	65	0,45	129	9,4	224	0,5
2	100	1,05	191	65,1	338	0,5
3	130	1,50	268	144,7	409	0,5

На рис. 8 при $c = 1,05$ мм показано распределение остаточных напряжений σ_{rr}^{res} в сечении $z = const$ в стенках трубки и коллектора (трубной доски) в зависимости от координаты r (расчетные данные). Там же приведены данные, полученные в работе [7]. Сопоставление показывает, что экспериментальные данные близки к расчетным в средней части стенки трубки при $z/c \approx 0,5$ и $7 < r < 8$ мм. Из рис. 7 следует, что режим сварки оказывает определенное влияние на остаточные напряжения в сварном шве.

На рис. 9 более наглядно, чем на рис. 7, представлены данные, полученные при $r = 8$ мм (при диаметре ТОТ 16 мм) и различных режимах сварки. Эти данные аппроксимировали путем линейного распределения в пределах $0 < z < c$ (штриховая кривая на рис. 8) при этом вычисляли M_{res} и F_{res} для $z_F/c = 0,5$ (табл. 1). Из табл. 1 видно, что увеличение c от 0,45 до 1,50 способствует повышению K_I^{res} по (2) от 224 до 409 МПа·мм^{1/2}.

В табл. 2 приведены рассчитанные по (2) и (6) характеристики нагружения при различном избыточном давлении P . Полученные данные сви-

детельствуют о том, что вклад остаточных напряжений от сварки увеличивается в сумме $K_I^P + K_I^{res}$ с возрастанием c и уменьшением P . При $P < 4$ МПа вклад остаточных напряжений в указанной сумме составляет более 66 % при $c = 0,45$ мм, 85 % при $c = 1,05$ мм и 91 % при $c = 1,5$ мм.

Свойства материала, определяющие целостность сварного соединения. Для получения данных о сохранении целостности сварного соединения по зависимости (1) необходимы сведения относительно расчетных сопротивлений материала сварного шва хрупкому разрушению K_{Ic} и его пластической неустойчивости (σ_T , σ_B). Поскольку сварка выполняется неплавящимся электродом, то металл шва приобретает свойства средние между материалом трубки и верхнего наплавленного слоя в коллекторе при температуре испытаний 15...30 °С.

Значения σ_B для материала ТОТ и наплавленного слоя составляют 640...700 МПа [5], а значения σ_T зависят от деформационного упрочнения (наклепа) и, согласно расчетным данным, полученным для металла шва, близки к $\sigma_T = 350...380$ МПа. Принимаем в качестве нормативных значений $\sigma_B^{nop} = 640$ МПа, $\sigma_T^{nop} = 350$ МПа. Соответственно расчетные значения σ_T и σ_B должны уменьшаться в n раз (здесь n — коэффициент запаса). Для режима гидротестирования по [8] принимается $n = 2$, т. е. расчетные значения составляют $\sigma_B = 320$ МПа, $\sigma_T = 175$ МПа.

Таблица 2. Характеристики нагружения сварных соединений от избыточного давления P и остаточных напряжений σ_{rr}^{res}

c , мм	P , МПа	σ_{rep} , МПа	K_I^P , МПа·мм ^{1/2}	$K_I = K_I^P + K_I^{res}$, МПа·мм ^{1/2}	L_r	K_r
0,45	0,2	15,20	9,60	233,6	0,087	0,228
	1,0	75,60	47,83	271,8	0,430	0,265
	2,0	151,20	95,70	319,7	0,860	0,312
	3,0	226,80	143,50	367,5	1,296	0,358
	4,0	302,40	191,40	415,4	1,730	0,405
1,05	0,2	3,30	3,20	337,2	0,029	0,341
	1,0	16,50	15,94	349,9	0,094	0,341
	2,0	33,00	31,90	365,9	0,188	0,357
	4,0	66,00	63,80	397,8	0,377	0,388
	10,0	165,00	159,40	493,4	0,940	0,481
	15,0	247,50	239,10	573,1	1,410	0,559
1,50	0,2	1,83	2,10	411,1	0,010	0,401
	1,0	9,15	10,44	419,4	0,052	0,409
	2,0	18,30	20,90	429,9	0,104	0,119
	4,0	36,60	41,80	450,8	0,203	0,440
	10,0	91,50	104,40	513,4	0,523	0,500
	15,0	137,20	156,60	565,6	0,784	0,552
	20,0	183,00	208,80	617,8	1,045	0,603
	25,0	228,70	261,00	670,0	1,300	0,653

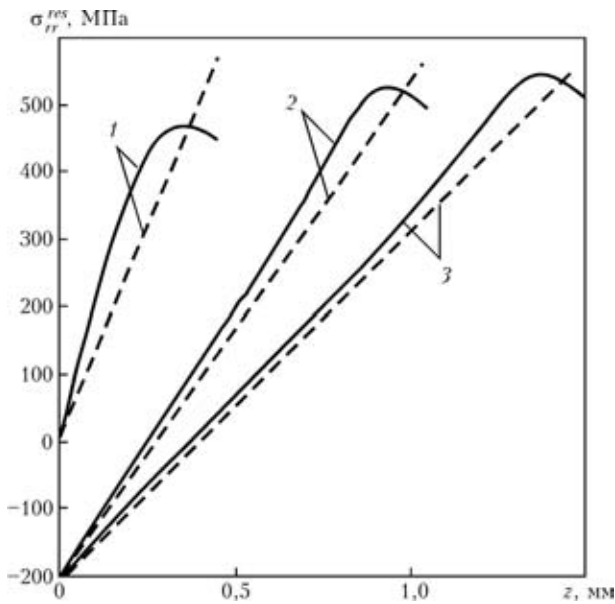


Рис. 9. Распределение остаточных напряжений σ_r^{res} по толщине перемычки в ее сечении ($r = 8$ мм) при режимах сварки, обеспечивающих $c = 0,45$ (1), 1,05 (2) и 1,50 мм (3): сплошные кривые — результаты упругопластического анализа; штриховые — аппроксимации

Для K_{Ic} можно использовать критические значения J -интеграла стали типа 08X18H10T. Соответствующие испытания проводились неоднократно. В частности, в работе [9] дано экспериментальное значение $K_c = 65 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2} = 2050 \text{ МПа}\cdot\text{мм}^{1/2}$, что достаточно консервативно. Если принять это значение в качестве нормативного, то расчетное значение составит $K_c = 2050/n = 1025 \text{ МПа}\cdot\text{мм}^{1/2}$.

Допускаемые значения избыточного испытательного давления воздуха. С учетом изложенного выше, т. е. при $n = 2$, получены следующие расчетные данные:

$$\sigma_T = \sigma_T^{HOP}/n = 175 \text{ МПа}; \sigma_B = \sigma_B^{HOP}/n = 320 \text{ МПа};$$

$$K_c = K_c^{HOP}/n = 1025 \text{ МПа}\cdot\text{мм}^{1/2}; L_r^{max} = \frac{\sigma_T + \sigma_B}{2\sigma_T} = 1,41;$$

используя зависимости (1) и данные табл. 2, получим для различных значений избыточного давления P координаты K_r и L_r (рис. 10). Значения этих координат для фиксированного значения c пропорциональны P , т. е. эти точки соединены прямой линией. Пересечение указанных кривых с кривой, построенной по (1), определяет критическое избыточное испытательное давление $P_{кр}$. В итоге получим:

c , мм	0,45	1,05	1,50
$P_{кр}$ МПа	2,70	11,2	19,0

Из приведенных данных следует, что при $c > 0,5$ мм избыточное испытательное давление (до 2,7 МПа) обеспечивает сохранение целостности сварных соединений труб с коллектором.

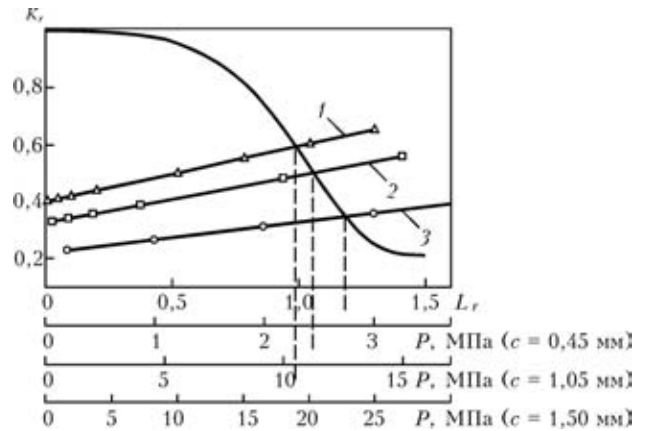


Рис. 10. Диаграмма, построенная путем наложения кривой предельного состояния $K_r = f(L_r)$ по (1) на расчетные точки $K_r(P)$, $L_r(P)$: 1 — $c = 0,45$ мм; $P_{кр} = 2,7$ МПа; 2 — $c = 1,05$ мм, $P_{кр} = 11,2$ МПа; 3 — $c = 1,50$ мм, $P_{кр} = 19,0$ МПа

К сожалению, значения c трудно контролируются неразрушающими методами. При сварке исходное значение c обычно не ниже 1 мм, однако при длительной эксплуатации оно может уменьшаться за счет коррозии. Особенно интенсивно это происходит при достаточно высоких значениях $K_I = K_I^P + K_I^{res}$, где K_I^{res} — это K_I при рабочем давлении примерно -10 МПа. Для исходных значений c и K_I^{res} (см. табл. 1) при $P = -10$ МПа получим

c , мм	0,45	1,05	1,50
$K_I = K_I^P + K_I^{res}$, МПа \cdot мм $^{1/2}$	-254	+179	+305
$K_I = K_I^P + K_I^{res}$, МПа \cdot мм $^{1/2}$	-8,03	+5,66	+9,6

Если использовать данные рис. 11 из работы [10], то при указанных значениях K_I скорость рос-

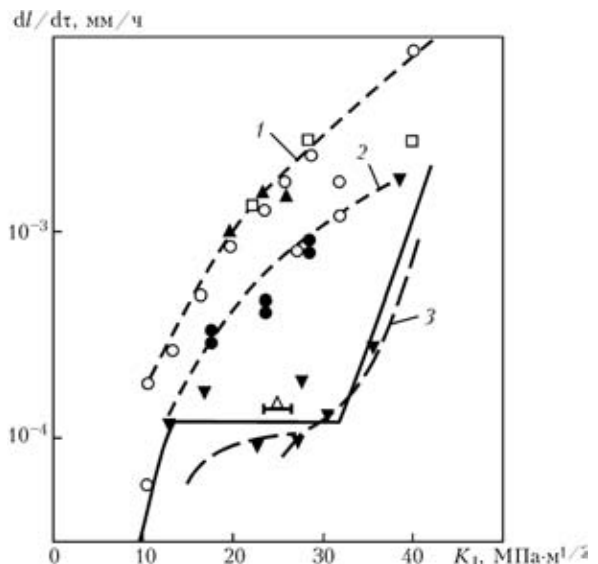


Рис. 11. Кинетика роста длины трещины межкристаллитной коррозии под напряжением при длительном статическом нагружении в хромоникелевых сталях при верхней (1), средней (2) и незначительной (3) сенсбилизации: \blacktriangledown — сенсбилизация при 650 °С, 2 ч, $O_2 \approx 0,2$ мг/л; \blacktriangle — то же, другая плавка; \bullet — различная сенсбилизация при $O_2 \approx 0,2$ мг/л; \circ — сенсбилизация при 650 °С, 24 ч, $O_2 \approx 8$ мг/л; \square — то же, но $O_2 \approx 0,2$ мг/л



та коррозионной трещины под напряжением не превышает $5 \cdot 10^{-5}$ мм/ч при $c = 1,5$ мм, $1 \cdot 10^{-5}$ мм/ч при $c = 1,0$ мм и значительно ниже $1 \cdot 10^{-6}$ мм/ч = $= 0,00876$ мм/год при $c = 0,45$ мм. С определенной консервативностью можно предположить, что такой закон снижения скорости роста коррозионной трещины сохраняется в процессе уменьшения значений c за счет коррозии от 1,50 до 0,45 мм. При $c \cong 0,5 \dots 0,6$ мм трещина закрыта за счет отрицательного давления $P = -10$ МПа и коррозионное разрушение очень незначительно.

Таким образом, исходя из 15...20-летнего срока эксплуатации парогенератора нет оснований считать, что расчетные значения c сварных соединений трубок будут ниже 0,45 мм, поэтому для сохранения целостности рассматриваемых сварных соединений можно при испытаниях допустить избыточное давление до 2,7 МПа.

1. *Методика* контроля 320.585.00.00.000. Парогенератор ПГВ-1000М. Пневмогидравлический аквариумный способ контроля герметичности. ПМ2/ГКАЭ ОКБ «Гидропресс». — Подольск, 1992. — 20 с.
2. *Assessment of the integrity of structures containing defects* / R. P. Harrison, K. Loosmore, J. Milne, R. Dowling: Rep. R/H. RG. — Rev. 2. — Berkley, 1980.

Increase in excessive pressure with pneumohydraulic aquarium method of control of leak-tightness of steam generators PGV-1000M leads to increase in gap between the heat-exchanging pipe and collector wall. As a result, extra stresses are formed at the gap bottom (weld root), which may lead to violation of integrity by the mechanism of initiation of a crack-like defect. The risk of fracture with growth of excessive pressure is evaluated.

3. *Механика* разрушения и прочность материалов: Справоч. пособие / Под ред. В. В. Панасюка: В 7 т. — Т. 2: Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами / М. П. Саврук. — Киев: Наук. думка, 1988. — 620 с.
4. *Прочность, устойчивость, колебания* / Под ред. И. А. Биргера, Я. Г. Пановко: В 3 т. — М.: Машиностроение, 1968. — Т. 1. — 831 с.
5. *Мелехов Р. К., Похмурский В. И.* Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. — К.: Наук. думка, 2003. — 381 с.
6. *Компьютерная программа «Приварка трубок к трубной решетке теплообменников»* / В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко, О. В. Махненко и др. // Автомат. сварка. — 2002. — № 8. — С. 3–10.
7. *Контроль* состояния металла: Отчет исследования причин приварки теплообменных труб к коллектору первого контура, прилегающих участков труб и наплавки ПГВ-1000М блока № 1 ХАЭС. 320-ЭКО-320 / ГКАЭ ОКБ «Гидропресс». — Подольск, 1994. — 37 с.
8. *Нормы* расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86). — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 525 с.
9. *Красовский А. Я., Орыняк И. В.* Оценка остаточного ресурса сварных швов трубопроводов первого контура АЭС, поврежденных межкристаллитной коррозией // Автомат. сварка. — 2000. — № 9/10. — С. 57–65.
10. *Horn R. M., Kass J. N., Ranganath K.* Evaluation of the growth and stability of stress corrosion cracking in sensitized austenitic pipings // Trans. ASME J. of Press. Vess. Tech. — 1984. — **106**, № 2. — P. 201–208.

Поступила в редакцию 06.10.2006



Международная конференция ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЕДИНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ



7–8 июня 2007 г.

г. Тимишоара Румыния

Тематика конференции:

Новые технологии соединения

Техника и технологии микросварки

Моделирование сварочных процессов

Проблемы при соединении новых материалов

По вопросу участия в конференции следует обращаться в секретариат:

тел.: +40 (0) 256 20 02 22; 49 18 31

Факс: +40 (0) 256 20 02 22; 49 27 97

E-mail: centa@isim.ro; isim@isim.ro

http:// www.isim.ro

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ — ПУТЬ К ПРОДЛЕНИЮ РЕСУРСА ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК*

Академик НАН Украины **И. М. НЕКЛУДОВ, Б. В. БОРЦ, А. Ф. ВАНЖА, А. Т. ЛОПАТА, Н. Д. РЫБАЛЬЧЕНКО, В. И. СЫТИН, С. В. ШЕВЧЕНКО**, кандидаты техн. наук
(ННЦ «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины)

Исследованы возможности получения стабильных неразъемных соединений сплавов на основе циркония и нержавеющей стали, применяющихся в твелах ряда ядерных реакторов, а также датчиках и шупах приборов контроля и управления реакторов. Методом сварки в твердой фазе получены и исследованы соединения циркония и нержавеющей стали с прослойками из ниобия и меди, позволяющими изделиям работать в коррозионной среде в условиях термоциклирования и при знакопеременных нагрузках. Изучена связь между структурными изменениями композита и его разупрочнением в процессе воздействия на него переменных тепловых полей.

Ключевые слова: цирконий, нержавеющая сталь, сварка, твердая фаза, композиционный материал, демпфирующие и барьерные прослойки, структура, термоциклирование, прочность

Твелы ряда ядерных реакторов, а также датчики и шупы приборов контроля и управления реакторов содержат неразъемные соединения циркония со сталями. Поэтому проблема получения надежных и долговечных соединений элементов конструкций, изготавливаемых из различных по свойствам материалов, пригодных для эксплуатации в жестких (переменных тепловых и радиационных полей) условиях, является весьма актуальной.

Существующее техническое решение изготовления неразъемных соединений сплавов на основе циркония и нержавеющей стали не в полной мере удовлетворяет ужесточающимся требованиям по безопасности ядерных реакторов.

Неразъемные адгезионные соединения разнородных металлов и сплавов на их основе, в частности, между цирконием и сталью, в настоящее время можно получать различными способами, например, сваркой взрывом, совместным прессованием, диффузионной сваркой, пайкой и др. [1, 2]. Такие способы формирования адгезионных швов между разнородными металлами и сплавами на их основе, в частности между цирконием и сталью, могут обеспечивать адгезионному шву в исходном состоянии довольно высокие прочностные свойства. Воздействие же на конструкционные материалы такого типа (имеющих в своем составе адгезионные швы, сформированные непосредственно между

цирконием и нержавеющей сталью) высоких тепловых потоков при повышенных температурах неизбежно приводит к возникновению вблизи адгезионного шва хрупких интерметаллидных фаз, которые могут приводить к возникновению хрупкости и потере целостности конструкции.

Одним из существенных факторов, определяющим надежность и долговечность изделий из композиционных материалов, работающих в жестких условиях (высокие тепловые потоки при повышенных температурах), является введение в состав композита барьерных и промежуточных прослоек. Рациональный выбор промежуточных (демпфирующих и барьерных) прослоек может на протяжении длительного времени эксплуатации при повышенных температурах обеспечивать высокую конструкционную прочность композита, высокие значения ударной вязкости, вакуумную и коррозионную стойкость и другие эксплуатационные свойства.

Работа направлена на обоснование выбора барьерных и демпфирующих прослоек и исследование возможности получения стабильных неразъемных соединений сплавов на основе циркония и нержавеющей стали.

Материалы и методы исследований. Для получения композитов использовали циркониевые сплавы и сталь 12X18H10T в аустенизированном состоянии. Нагрев и деформацию пакетов проводили на вакуумном прокатном стане ДУО-170 конструкции ННЦ ХФТИ [3].

Выплавку экспериментальных слитков материалов, используемых в качестве барьерных и демпфирующих прослоек, проводили на электронно-лучевой установке в вакууме не хуже $1 \cdot 10^{-3}$ Па. Кристаллизацию материалов, за исключением

* Статья подготовлена по результатам выполнения целевой комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» (2004–2006 гг.).



Рис.1. Микроструктура композита цирконий–ниобий–медь–сталь в исходном состоянии, X70

материалов на медной основе, вели в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе. Медные материалы кристаллизовали в водоохлаждаемом кристаллизаторе с графитовой вставкой при ступенчатой вытяжке слитков. Металлографические исследования структуры материалов проводили

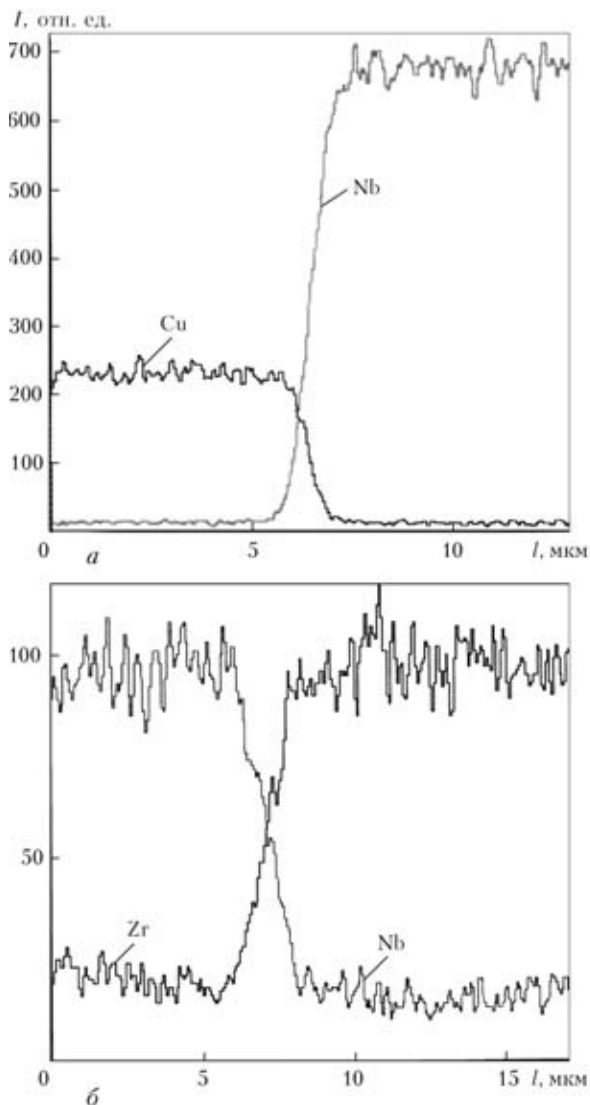


Рис. 2. Спектры микроанализа вблизи границ сопряжения: а — ниобий–медь; б — ниобий–цирконий

на продольных и поперечных шлифах с использованием микроскопа «МИМ-8М».

Механические свойства композитов определяли на цилиндрических образцах, вырезанных из композитов по толщине перпендикулярно границе сопряжения слоев. Термоциклические испытания проводили на кольцевых образцах в температурном интервале 200...800 °С при скорости нарастания температуры 50 град/мин, испытания продолжали до потери сплошности соединений.

Результаты исследований и их обслуживание. Структура композита цирконий–ниобий–медь–сталь. Из рис. 1 видно, что границы сопряжения слоев разнородных материалов чистые. Переходные зоны после травления не выявлены. Микрорентгеноспектральный анализ показывает наличие твердорастворимых зон на границах сопряжения ниобий–медь (рис. 2, а) и ниобий–цирконий (рис. 2, б).

Кинетика термической усталости слоистых конструкционных материалов. При воздействии на композитный материал переменного теплового поля в результате возникающего градиента температур в материале проявляются механические напряжения, обусловленные различиями коэффициентов термического расширения металлов, составляющих композит. Релаксация механических напряжений, возникающих под действием переменных термических полей, сопровождается генерацией и перемещением дислокаций, накоплением сверхравновесных концентраций вакансий. Накопленное избыточное количество дефектов кристаллической решетки в свою очередь стимулирует процессы, контролируемые диффузией: образование фаз, рекристаллизацию, полигонизацию и др. Под действием циклических напряжений повышается термодинамический потенциал системы, изменяются по сравнению со статическими условиями энергия активации релаксационных процессов, возникают новые направления диффузионных потоков, перераспределяются примеси и легирующие добавки, имеющиеся в материалах, составляющих композит, зарождаются структурные дефекты, развиваются поры и формируются трещины.

Исследования кинетики образования и развития структурных дефектов показывают, что структурные изменения в процессе воздействия на слоистый конструкционный материал переменных термических полей проявляются в наиболее мягкой составляющей композита, структура основных, более жестких составляющих, при этом практически не изменяется. Структурные изменения в мягкой составляющей композита являются результатом процессов деформаций, реализуемых скольжением, двойникованием и межзерненным скольжением; процессов накопления точечных дефектов, размножения и аннигиляции дислокаций, формирования и распада дислокационных скоплений, образования и

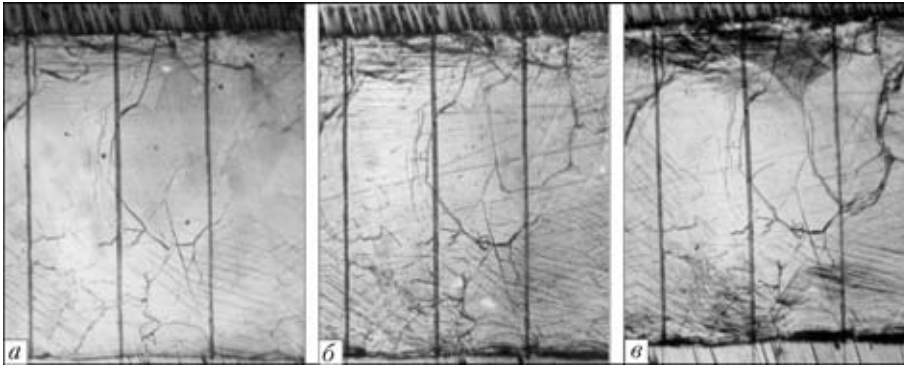


Рис. 3. Микроструктура композита ниобий–медь–сталь в температурном интервале термоциклирования 300...800 °С после одного (а), 15 (б) и 20 (в) термоциклов, $\times 70$

залечивания пор, микротрещин и трещин. Процесс термоциклической усталости мягкого слоя в слоистом композите характеризуется высокой интенсивностью накопления структурных дефектов. После первого термоцикла (рис. 3, а) в мягком медном слое проявляются внутризеренные полосы скольжения, одна часть которых стопорится на границах зерен, а другая — на значительном расстоянии от границ. Так, после нескольких термоциклов композита ниобий–медь–сталь в температурном интервале 300...800 °С в медном слое проявляется значительный деформационный рельеф. По мере увеличения теплосмен количество полос скольжения, их протяженность и интенсивность возрастает, а после 15...20 теплосмен (рис. 3, б, в) процесс образования новых полос скольжения практически прекращается: проявляется слияние соседних полос в широкие полосы скольжения, которые располагаются параллельно либо под малыми углами к границам сопряжения составляющих композит.

Формирование широких полос скольжения свидетельствует об интенсификации диффузионных процессов, облегчающих переползание дислокаций. Полосы скольжения располагаются по толщине мягкого слоя неоднородно. Так, деформа-

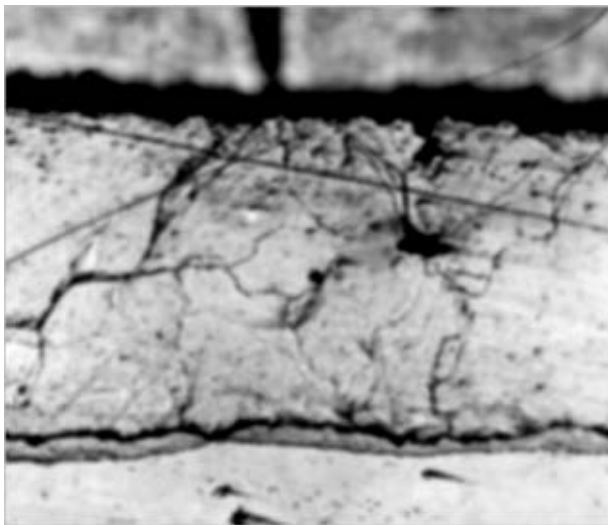


Рис. 4. Зернограничное проскальзывание и миграции границ зерен в композите ниобий–медь–сталь в температурном интервале термоциклирования 300...800 °С после 25 термоциклов, $\times 70$

ционные полосы, локализованные в процессе первых термоциклов, у границ сопряжения меди с ниобием и стали (в случае композита ниобий–медь–сталь), по мере роста количества термоциклов распространяются на всю толщину медного слоя. При этом неравномерность распределения сохраняется: их плотность максимальна у границы сопряжения меди с ниобием, несколько ниже у границы сопряжения меди со сталью и минимальна в средней части слоя.

В процессе термоциклического воздействия на композит, в состав которого входит демпфирующий слой из меди, в ней проявляются признаки зернограничного проскальзывания и миграции границ зерен (рис. 4). Первоначально после нескольких теплосмен миграция границ зерен в медной прослойке наблюдается практически по всей толщине прослойки. Исключение составляет зона шириной 3...5 мкм у границы сопряжения меди со сталью (для композита ниобий–медь–сталь). С увеличением количества теплосмен ширина зоны, где блокируется миграция границ зерен, растет: в слое меди толщиной 0,8 мм слоистого композита с основными составляющими металлами из ниобия и нержавеющей стали 12Х18Н10Т ширина зоны, примыкающей к нержавеющей стали, в которой заблокированы границы зерен, составляет около 30 мкм, после 50 термоциклов — около 45 мкм. Следует отметить, что в этой зоне слоя меди формируется более мелкозернистая структура; ее ширина, как показывают

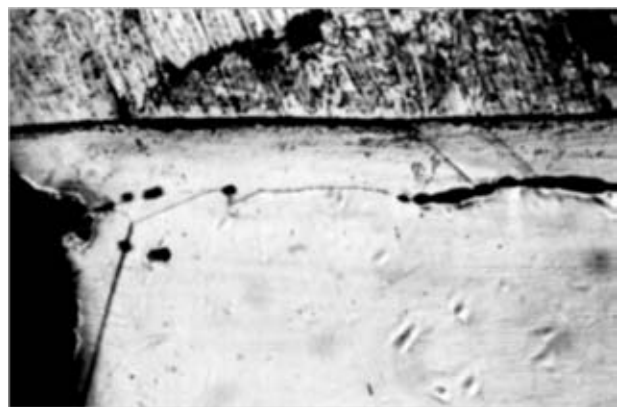


Рис. 5. Микроструктура композита ниобий–медь–сталь в температурном интервале термоциклирования 300...800 °С после 35 термоциклов, $\times 300$

**Таблица 1. Влияние термических воздействий на свойства слоистого композиционного материала на основе циркониевых сплавов и нержавеющей стали**

Композит	Ширина интерметаллидной зоны (мкм) после отжига, °С (время, ч)			Количество термоциклов до потери сплошности при термоциклировании 200...800 °С
	исходная	700 °С, 100 ч	1000 °С, 10 ч	
Цирконий–сталь	1...3	10...15	.	5...10
Цирконий–ниобий–медь–сталь	Не обнаружено	Не обнаружено	Не обнаружено	80...90
Цирконий–хром–сталь	»	»	»	35...45
Цирконий–ванадий–никель–сталь	1...3	5...10	.	10...15

Таблица 2. Прочность образцов циркониевых композитов при испытании на отрыв слоев

Композит	Термообработка, °С					
	20		300		700	
	Предел прочности, МПа	Место разрушения	Предел прочности, МПа	Место разрушения	Предел прочности, МПа	Место разрушения
Цирконий–сталь	450	Граница	350	Граница	250	Граница
Цирконий–ниобий–медь–сталь	400	Медь	270	Медь	120	Медь
Цирконий–хром–сталь	430	Хром	370	Хром	280	Хром
Цирконий–ванадий–никель–сталь	460	Граница	320	Граница	230	Граница

оценки, соответствует диффузионному проникновению в медь никеля из нержавеющей стали.

После 25...30 термоциклов в медном слое композита ниобий–медь–сталь появляются разрешимые в оптическом микроскопе микропоры, зарождение и рост которых наблюдается вблизи границы сопряжения меди со сталью в промежутке толщин 25...50 мкм, преимущественно на границах зерен, расположенных параллельно границе сопряжения составляющих.

Первые поры появляются вблизи свободной поверхности композита. С увеличением теплосмен поры появляются на все большем удалении от поверхности, оставаясь расположенными в основном в приграничном участке слоя меди — у границ сопряжения меди с ниобием. Дальнейшее повышение теплосмен ведет к увеличению количества и размера пор, их слиянию и формированию микротрещин (рис. 5) по всему периметру образца. В случае композиционного материала цирконий–сталь с барьерными прослойками из ниобия и демпфирующей прослойкой из меди микротрещина формируется на расстоянии 20...50 мкм от границы сопряжения меди и стали.

Термостабильность переходниковых элементов биметалла цирконий–сталь. Результаты исследований по термическому влиянию на свойства слоистых композиционных материалов на базе циркония и нержавеющей стали приведены в табл. 1, 2.

Исследования показывают, что применение системы прослоек позволяет создать слоистые композиты на основе циркония и стали, пригодные для длительной эксплуатации в условиях

повышенных нестационарных температурных и силовых полей. Лучший комплекс свойств проявляют композиты с прослойкой меди или системной прослойкой медь–ниобий.

В ходе исследований обнаружена связь между структурными изменениями композита и его разупрочнением в процессе воздействия на него переменных тепловых полей. Снижение прочности композиционного материала по мере увеличения термоциклов обусловлено накоплением дефектов в мягком демпфирующем слое. В нем формируются микропоры и микротрещины по границам зерен и микротрещины у границ сопряжения составляющих.

Термоциклическую выносливость слоистых композиционных материалов можно увеличивать, повысив структурно-фазовую стабильность материалов барьерных и демпфирующих прослоек, в частности, за счет введения в них микродобавок химически активных элементов [4].

Таким образом, разработана и исследована технологическая схема соединений (цирконий–нержавеющая сталь) в твердой фазе на основе образования межатомных связей между разнородными материалами для применения в реакторе ВВЭР-1000. Новый технологический процесс предназначен в качестве замены механических креплений, используемых в концевиках твелоов. Исследованы соединения цирконий–сталь с прослойками ниобий–медь, позволяющими изделиям работать в условиях термоциклирования и при знакопеременных нагрузках, при высоких температурах.

1. Айсфельдер Х., Франк К., Войцингер Х. Соединения цирконий–сталь для испарительно-перегревательных твелоов // Атом. техника за рубежом. — 1969. — № 2. — С. 37–41.
2. Фролов Н.Г., Шилков Ю.Б. Сварка совместным прессованием нержавеющей стали с циркониевыми сплавами // Свароч. пр-во. — 1974. — № 5.
3. Исследование процессов сварки многослойных структур из кристаллитов различного химического состава, перспективных для применения в атомной энергетике / Б.В. Борца, И.М. Неклюдов, А.Т. Лопата и др. // Вопр. атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. — 2005. — № 5. — С. 156–158.
4. Роль микролегируемых демпфирующих и барьерных прослоек в повышении термоциклической выносливости композитного материала на основе титана и нержавеющей стали / А.Т. Лопата, И.М. Неклюдов, С.В. Шевченко и др. // Науч. ведомости. — 2001. — № 1(14). — С. 168–171.

Possibilities have been investigated for producing stable permanent joints of alloys on zirconium and stainless steel base, used in fuel elements of some nuclear reactors, and also in sensors and probes of units for monitoring and control of reactors. Using the method of a solid-phase welding, the joints of zirconium and stainless steel with interlayers of niobium and copper, allowing the elements to operate in corrosion medium under the conditions of thermocycling and at alternating loads were produced and examined. Relation between structural changes of composite and its weakening in the process of effect of alternating thermal fields on it was studied.

Поступила в редакцию 29.12.2006

IV ВСЕУКРАИНСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

23–25 мая 2007 г.

г. Ворзель Киевская область

Организаторы: Совет научной молодежи Института электросварки им. Е. О. Патона при поддержке Национальной академии наук Украины

Тематика конференции

- Прогрессивные технологии и соединения материалов
- Прочность, надежность и долговечность сварных конструкций
- Технологии наплавки, нанесения покрытий и обработки поверхности
- Процессы специальной электрометаллургии
- Новые конструкционные и функциональные материалы
- Техническая диагностика и неразрушающий контроль
- Автоматизация процессов сварки и родственных технологий
- Исследование физико-химических процессов и явлений в материаловедении
- Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах

Контакты:

**тел.: (+38044) 271-25-60 Войнарович Сергей Григорьевич,
E-mail: vorzel2007@ukr.net**



СВАРКА ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ (Обзор)

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

Рассмотрены особенности различных способов сварки неплавящимся электродом титана и его сплавов в инертных газах. Даны рекомендации по применению различных способов сварки, отмечены их преимущества и недостатки.

Ключевые слова: дуговая сварка, неплавящийся электрод, титановые сплавы, защитный газ, сварка погруженной дугой, сварка в узкий зазор, сварка сквозным проплавлением, плазменная сварка, микроплазменная сварка, технология, толщина металла, дефекты, контроль качества

Титан и его сплавы благодаря высокой удельной прочности и коррозионной стойкости, а также жаропрочности в определенном диапазоне температур широко используются в качестве конструкционных материалов в современном машиностроении. При этом дуговая сварка является ведущим технологическим процессом для получения неразъемных соединений. Главные трудности, возникающие при сварке титана, связаны с его химической активностью при высоких температурах (особенно в расплавленном состоянии) по отношению к составляющим воздуха. В этом случае обязательным условием получения качественного соединения является надежная защита от контактов с газами атмосферы не только зоны соединения, но и его остывающих участков (вплоть до температуры 300...400 °С). При сварке плавлением необходимо обеспечить также надежную защиту корня шва, если даже металл нагрелся выше указанной температуры, но еще не расплавился [1–4].

Во всем мире разработано и изготавливается в промышленных условиях значительное количество деформируемых титановых сплавов различного назначения. В зависимости от характера воздействия на титан разных легирующих элементов его промышленные сплавы, исходя из типа структуры, подразделяются на следующие группы [2, 3, 5, 6]:

α- и псевдо-α-сплавы (на основе α-фазы с 2...7 % β-фазы в равновесном состоянии). Они технологичны (из них изготавливают все типы полуфабрикатов), отличаются удовлетворительной пластичностью, свариваемостью и высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах. Сварка плавлением сплавов этого класса возможна в широком диапазоне параметров режима.

Сварные конструкции из этих сплавов подвергают неполному отжигу при температуре ниже 700 °С;

двухфазные α + β- и псевдо-β-сплавы (структура на основе β-фазы с небольшим количеством α-фазы). После отжига они приобретают удовлетворительные свойства. Однако широкому применению в сварных конструкциях таких высокопрочных сплавов препятствует недостаточная пластичность соединений в термически упрочненном состоянии. Для получения сварных соединений из сплавов этого класса рекомендуется однопроводная сварка без разделки кромок. В зависимости от условий эксплуатации сварные соединения подвергают отжигу или упрочняющей термической обработке — закалке и старению;

β-сплавы — это высоколегированные сплавы со стабильной структурой β-фазы, имеющие высокую коррозионную стойкость. Для получения соединений сплавов этого класса наиболее перспективными являются аргонодуговая и электронно-лучевая сварка.

Для изготовления сварных конструкций из титана и его сплавов различных классов применимы почти все способы сварки, используемые для получения соединений сталей и цветных металлов [3–11]. Однако до настоящего времени способ сварки титана вручную покрытыми электродами пока еще не разработан. Качество сварных соединений титана во многом определяется специфическим термомодеформационным циклом дуговой сварки, отличающимся от такового в случае сварки сталей. При сварке титана потери энергии меньше, а продолжительность пребывания в области высоких температур металла зоны термического влияния (ЗТВ) в 2...3 раза больше. Чувствительность к термическому циклу сварки проявляется в α→β-превращении, быстром росте зерна высокотемпературной β-фазы при нагреве выше области структурных превращений, перегреве и образовании хрупких фаз при охлаждении и старении.

Высокая химическая активность титана по отношению к составляющим воздуха ([O], [N], [H]) приводит к насыщению ими металла сварного со-

единения, а это в свою очередь — к его охрупчиванию и снижению механических свойств (пластичности, длительной прочности) и коррозионной стойкости. Значительное насыщение металла в процессе сварки происходит уже при $T \geq 350$ °С. В связи с этим необходимо обеспечить надежную защиту зоны сварки, имеющую температуру 350 °С, от контактов с воздухом. С этой целью используются аргон 1-го и высшего сортов (ГОСТ 10157 и EN 439), гелий высокой частоты (ТУ 51-940-8 и EN 439), их смеси (EN 439) и специальные бескислородные флюсы. Сварка в вакууме также исключает возможность взаимодействия титана с газами.

Необходимым условием получения качественных соединений титана и его сплавов является регулирование механических свойств и структуры металла швов и ЗТВ путем выбора оптимальных технологий и сварочных материалов, а также режимов сварки, обеспечивающих ее выполнение при минимально возможной погонной энергии. Качество полученных сварных соединений во многом определяется технологией подготовки кромок под сварку и составом (маркой) присадочной титановой проволоки.

Подготовку кромок заготовок выполняют с использованием газовой, плазменной и газолазерной резки (режущий газ — аргон) [12]. Газовую резку титана осуществляют на более высокой скорости и пониженной мощностью пламени по сравнению с резкой стали. Это связано с более интенсивным выделением тепла в зоне реза. После газовой и плазменной резки обработку кромок механическим способом следует выполнять на глубине 3...5 мм. После выполнения газолазерной резки в этом нет необходимости. При механической обработке шероховатость поверхности кромок должна быть не хуже $Rz = 40$ (ГОСТ 2789). Поверхности деталей, прилегающие к кромкам с обеих сторон на расстоянии не менее 20 мм, могут зачищаться шабером, электрокорундовым кругом, вращающейся металлической щеткой, мелкой наждачной шкуркой, кругами с накаткой из абразивного материала или вулканитовым кругом. При зачистке абразивными кругами не допускается перегрев металла, вызывающий на поверхности сварного соединения образование цветов побежалости. Непосредственно перед прихваткой и сваркой подготовленные поверхности сварного соединения, а также сварочная проволока обезжириваются. Влагу с них удаляют с помощью бязевых салфеток, смоченных ацетоном и техническим этиловым спиртом.

При выборе способов сварки титановых сплавов следует исходить из необходимости обеспечения надежной защиты зоны сварки и остывающих участков соединения от контактов с воз-

духом, а также учета особенностей соединения металла малой, средней и большой толщины.

Для сварки титана широко применяют дуговые способы сварки, из которых наиболее распространенной являются сварка неплавящимся вольфрамовым электродом в инертных газах (автоматическая, механизированная и ручная). Они далее будут рассматриваться в настоящей работе.

Способ сварки ТИГ является универсальным, поскольку позволяет выполнять соединения в различных пространственных положениях, в том числе в стесненных условиях, и не требует переналадки оборудования при изменении толщины свариваемого металла и типа соединения.

Сварка ТИГ титана выполняется на постоянном токе прямой полярности. Вольфрамовый электрод является катодом и от его стойкости к разрушению, формы заточки, постоянства эмиссионной способности во многом зависят стабильность процесса сварки, качество формирования швов и глубина провара. Электроды из чистого (нелегированного) вольфрама из-за малой стойкости к разрушению для сварки титана непригодны. Для этого способа сварки применяют электроды из легированного вольфрама марок ЭВЛ (WL10), ЭВИ-2, ЭВТ-12 (WT20) в соответствии с ГОСТ 23949-80 (EN 26848 NF). Диаметр неплавящегося электрода выбирают в зависимости от значений сварочного тока с учетом допустимой нагрузки по току. Угол заточки составляет 30...45°. Перед началом работы заточенный вольфрамовый электрод подвергают обработке путем пятикратного зажигания дуги на рабочем токе. При продолжительной работе электрод постепенно разрушается и его следует периодически перезатачивать [5, 6, 9].

В зависимости от размеров и конфигурации свариваемых изделий из титана применяют следующие типы защиты зоны сварки инертным газом [5, 6, 9]:

общая защита изделия в камере с контролируемой атмосферой инертного газа, обеспечивающая наиболее надежную и стабильную защиту зоны сварки и остывающих участков сварного соединения сверху и снизу корня шва. Используется в серийном производстве и при изготовлении изделий сложной формы;

местная защита сварного соединения с использованием малогабаритных камер, обеспечивающая стабильное качество сварных соединений при сварке поворотных и неповоротных стыков трубчатых конструкций. При этом обратная сторона шва защищена благодаря заполнению инертным газом полости изделия или его части;

струйная защита зоны сварки и остывающих участков соединения, осуществляемая путем их непрерывного обдува с помощью сопла с увеличенным по сравнению с другими металлами диа-

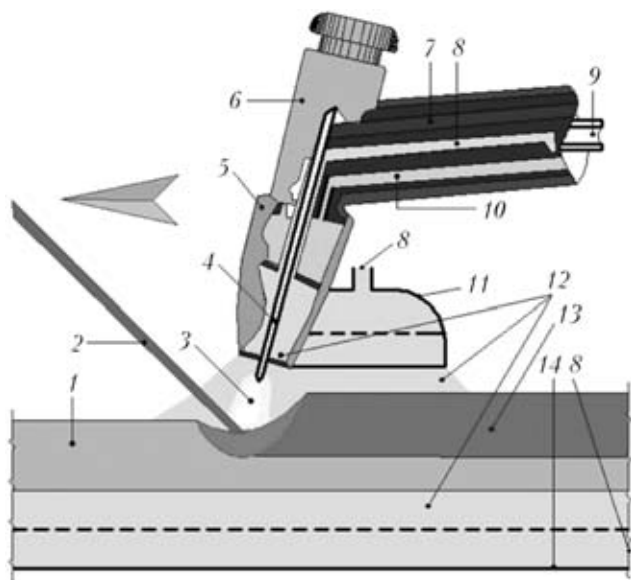


Рис. 1. Схема ручной сварки ТИГ титана: 1 — свариваемый металл; 2 — присадочная проволока; 3 — дуга; 4 — неплавящийся электрод; 5 — сопло; 6 — корпус горелки; 7 — подача охлаждающей воды; 8 — подача защитного газа; 9 — токоподвод; 10 — отвод воды; 11 — насадка для защиты остывающих участков шва; 12 — защитная среда; 13 — металл шва; 14 — приспособление для защиты обратной стороны шва

метром отверстия и удлиненной насадкой. Обдув корня шва происходит с подачей инертного газа снизу. При этом защитный газ подается по трем каналам — в сопло 5, удлиненную насадку 11 и формирующую защитную подкладку 14 (рис. 1). Несмотря на то, что обеспечить надежную защиту в этом случае сложно, указанный способ сварки получил широкое распространение в сварочном производстве. Стабильное высокое качество сварных соединений, выполненных на воздухе, обеспечивается путем применения автоматической сварки.

При ручной сварке ТИГ для защиты остывающих участков сварного соединения используют насадку 11 (рис. 1), закрепленную на горелке. Ее ширину выбирают в зависимости от ширины ЗТВ сварного соединения, а длину при сварке тонкой пластины находят из выражения

$$l = (0,006 I_{св}^2 U_{д}^2) / (T^2 v_{св} b)^{-d_c/2},$$

где $I_{св}$ — ток сварки, А; $U_{д}$ — напряжение на дуге, В; T — температура, ниже которой металл не следует защищать ($T < 400$ °С); $v_{св}$ — скорость сварки, см/с; b — толщина металла, см; d_c — внутренний диаметр сопла, см.

Защиту корня шва и прилегающих нагретых участков сварного соединения осуществляют путем плотного поджатия кромок к медным или стальным подкладкам с формирующими канавками и системой отверстий для подачи защитного газа (рис. 2) [5, 6, 9].

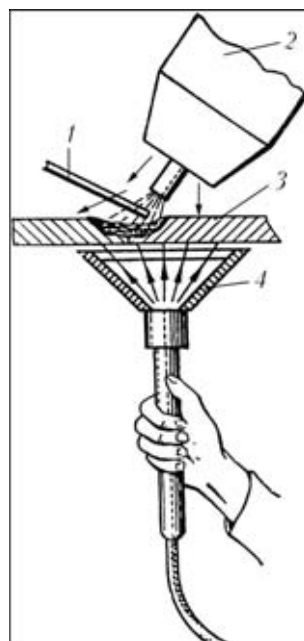


Рис. 2. Схема защиты корня шва при выполнении ремонтной сварки: 1 — присадка; 2 — горелка; 3 — изделие; 4 — местный поддув

Во избежание перегрева металла свариваемых кромок при дуговой сварке титана ограничивают максимальный сварочный ток. Так, при сварке поверхностной дугой неплавящимся электродом он не должен превышать 300 А. Это позволяет сваривать за один проход без разделки кромок пластины титана с $b \leq 3$ мм. Стыковые соединения пластин титана большой толщины выполняют многослойной сваркой с разделкой кромок и использованием присадочной проволоки. При сварке титана осуществляют следующую разделку кромок: при толщине пластины 4...10 мм — V-образную с углом раскрытия 70...90°; при $b = 10...15$ мм — X-образную с углом раскрытия 50...70°; при $b > 15$ мм — рюмкообразную с углом раскрытия 30°. Притупление во всех случаях составляет 1,5...2,0 мм, а зазор — не более 10 % толщины пластины титана.

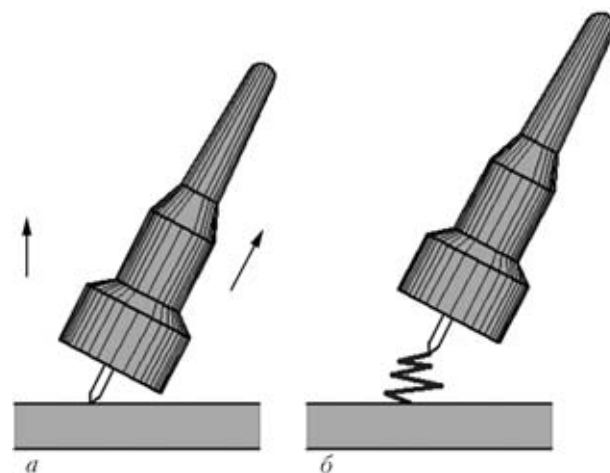


Рис. 3. Схема поджига дуги при ручной сварке ТИГ титана с использованием горелки с «газовой линзой» касанием (а) и с помощью осциллятора — устройства стабилизации горения дуги (б)

Для удаления воздуха из газовой системы защитный газ в горелку и защитные приспособления подаются за 1...2 мин до начала сварки. Поджиг дуги осуществляется касанием изделия вольфрамовым электродом (рис. 3, а) или с помощью осциллятора (рис. 3, б). Перед началом сварки на принятом режиме качество защиты рекомендуется проверить на титановом образце путем поджиг дуги на «точку», которая должна иметь блестящий серебристый цвет. Ручную сварку выполняют без колебательных движений горелки на короткой дуге углом вперед. Угол между электродом и присадочной проволокой поддерживается в пределах 90° , а подача проволоки осуществляется непрерывно. При этом необходимо следить за тем, чтобы разогретый конец присадочной проволоки был постоянно защищен инертным газом. Если в силу каких-либо причин он подвергнется воздействию воздуха, то окисленный конец следует удалить механическим способом. После окончания сварки или случайного обрыва дуги защитный газ должен подаваться до тех пор, пока металл не остынет до $T < 400^\circ\text{C}$.

Об эффективности газовой защиты при сварке и последующем охлаждении сварного соединения можно судить по внешнему виду шва: о хорошей защите и высоких свойствах соединения свидетельствует его блестящая серебристая поверхность. Защита считается удовлетворительной, если поверхность шва имеет соломенно-желтый цвет. Такой шов допускается оставлять без исправления. Если поверхность шва приобрела светло-синий цвет, то ее необходимо зачистить металлической щеткой. Швы с поверхностью синего или серого цвета не допустимы и подлежат удалению.

Следует учитывать то, что хорошая защита при сварке влияет не только на качество швов, но и на стойкость неплавящегося электрода.

Для сварки титановых сплавов разных классов разработаны и выпускаются промышленностью сварочные титановые проволоки различного состава, которые в соответствии с ГОСТ 27265–87 и AWS A5.16/A5.16M:2004 [3, 4, 9, 13] поставляются в травленном и дегазированном состоянии. В качестве присадки могут использоваться также прутки из основного металла, которые предварительно должны подвергаться вакуумному отжигу. При сварке коррозионностойких титановых сплавов, легированных небольшими добавками, например палладия или рутения, для обеспечения необходимой коррозионной стойкости металла швов присадочная проволока также должна быть легирована этими элементами.

Ориентировочные режимы ручной сварки ТИГ титана следующие: $b = 3$ (10) мм; диаметр вольфрамового электрода $d_w = 2,5...3,0$ (3,0...4,0) мм; диаметр присадочной проволоки $d_n = 2,0...3,0$

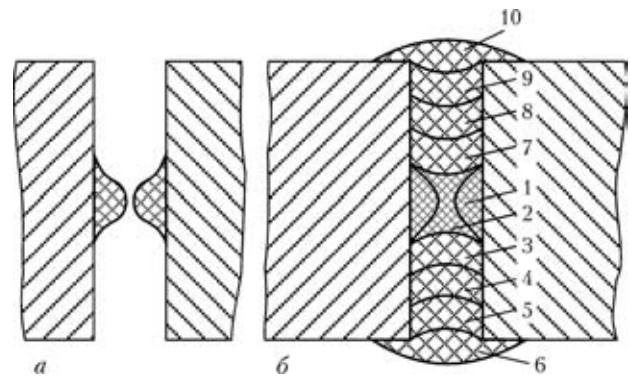


Рис. 4. Схема последовательности выполнения сварки по щелевому зазору: а — соединение с наплавками, собранное под сварку; б — порядок выполнения проходов (обозначен цифрами)

(2,0...3,0) мм; $I_{св} = 120...150$ (160...200) А; $U_d = 10...14$ (12...16) В.

Для повышения производительности ручной сварки ТИГ конструкций из толстолистового титана ($b \geq 15$ мм) разработана технология сварки низколегированных титановых сплавов по щелевому зазору без скоса кромок. По сравнению со сваркой с X-образной разделкой кромок эта технология имеет следующие преимущества: снижение в 2...3 раза объема и массы наплавленного металла, что позволяет сократить расход дорогостоящих сварочных материалов и повысить производительность процесса сварки в 2...3 раза; возможность регулировки механических свойств сварных соединений как путем изменения химического состава сварочных проволок, так и использования эффекта контактного упрочнения металла шва, работающего в условиях, характерных для так называемых мягких прослоек; наличие щелевого зазора, улучшающего газовую защиту, стабилизирующего сварочный процесс и повышающего КПД источника нагрева; уменьшение накладных расходов благодаря сокращению механической обработки кромок под сварку, а также расхода электроэнергии [1, 5].

Перед сборкой под сварку к торцам кромок, предварительно обработанных механическим способом, приваривают выводные планки из листа титана с $b = 3...4$ мм, а в средней части кромки выполняют трехслойную наплавку (рис. 4, а). Для обеспечения плавного перехода от наплавленного валика к кромкам свариваемого металла часто выполняют сглаживающие валики без присадки. Подготовленные таким образом детали собирают под сварку и прихватывают с зазором 2...3 мм между наплавленными слоями.

Сварка соединений по щелевому зазору осуществляется в определенной последовательности (рис. 4, б). Сначала выполняют соединительные швы ($I_{св} = 160...180$ А), затем — первый проход с использованием присадочной проволоки ($d_n = 3...4$ мм), а второй с обратной стороны без при-

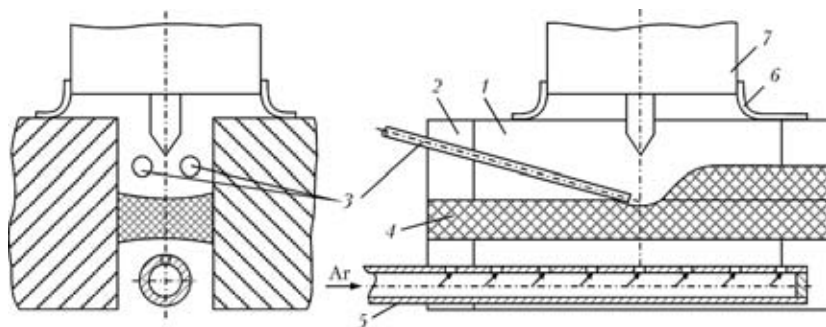


Рис. 5. Схема сварки по щелевому зазору: 1 — свариваемая деталь; 2 — выводные планки; 3 — двоянная присадка; 4 — наплавленный металл; 5 — приспособление для поддува; 6 — щиток-отражатель; 7 — сопло горелки

садки. Основные слои выполняют на токе: $I_{св} = 380...400$ А и $d_{п} = 5$ мм.

Получение качественного соединения обеспечивается при условии, если поверхность каждого слоя будет иметь вогнутую менисковую форму с плавным переходом к кромкам свариваемых деталей, что исключает образование межваликовых несплавлений.

Сварка по щелевому зазору имеет ряд особенностей. Так, вылет вольфрамового электрода с $d_{п} = 4$ мм устанавливается из расчета расположения сопла горелки на расстоянии 2 мм от поверхности свариваемых листов. Ось электрода должна быть перпендикулярна к поверхности листов, обратная сторона шва защищена от окисления струей аргона, которая подается через трубку с радиальными отверстиями (рис. 5).

При выполнении внутренних слоев расход аргона составляет 12...14 л/мин. Узкая и глубокая щель обеспечивает качественную защиту наплавленного металла без применения насадок; при этом используется щиток-отражатель, который надевается на сопло горелки. При наложении внешних слоев применяют насадку для дополнительной подачи аргона 6...8 л/мин. Для соединения титановых плит шириной $b = 110$ мм предложена технология сварки вольфрамовым электродом в узкий зазор магнитоуправляемой дугой [11]. Сварные швы, выполненные по указанным технологиям, отличаются высоким качеством. Поры и другие дефекты в них отсутствуют.

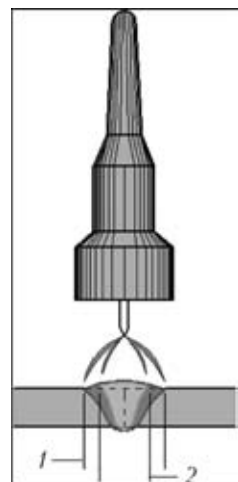


Рис. 6. Схема геометрии сечения металла шва при сварке ТИГ с непрерывной (1) и импульсной (2) дугой

Для повышения эффективности сварки ТИГ титановых сплавов разработан [5–7] и впервые применен способ сварки неплавящимся вольфрамовым электродом с применением фторидных флюсов-паст (ТИФ-Ф). Сварка

ТИГ-Ф расширяет технологические возможности дуги, позволяет увеличить глубину проплавления, уменьшить погонную энергию процесса сварки и предупредить образование пор в металле шва. Этот способ сварки дает возможность сваривать за один проход без разделки кромок титановые плиты шириной $b \leq 6$ мм, выполнять швы любого типа с использованием присадочной проволоки и без нее, в нижнем положении и на вертикальной плоскости. Расход флюса не

зависит от толщины свариваемого металла и составляет около 10 г на погонную длину шва 1 м.

Дальнейшим развитием способа сварки ТИГ-Ф является сварка с присадочной порошковой проволокой, позволяющая выполнять швы за один проход без разделки кромок на титановых плитах толщиной $b = 5...16$ мм. Расход присадочной порошковой проволоки составляет около 1,5 м на погонную длину шва 1 м. При этом поры в металле шва отсутствуют. Однако сварка ТИГ-Ф требует высокой точности сборки свариваемых заготовок [5–7, 14].

В настоящее время широкое применение нашли также механизированная и автоматическая сварка неплавящимся электродом в инертных газах. Эти способы сварки позволяют изменять в широком диапазоне размеры и форму сварных соединений, обеспечивают получение швов с удовлетворительным качеством поверхности. При сварке пластин титана толщиной $b \geq 6$ мм выполняют двухстороннюю сварку. К недостаткам указанных способов сварки следует отнести склонность металла шва к образованию пор и высокий уровень деформаций в сварных соединениях. Устранить или уменьшить эти недостатки позволяет использование импульсно-дуговой сварки (рис. 6). Регулируя ток, скорость, а также длительность импульса и паузы, можно в широких пределах изменять размеры швов. Применение импульсно-дуговой сварки ТИГ обеспечивает хорошее формирование сварного шва с плавным переходом к основному металлу, а также уменьшает неравномерность поля остаточных напряжений и уровень их концентрации в зоне сварки при эксплуатации изделий под нагрузкой [5, 6].

С целью увеличения проплавляющей способности дуги при сварке ТИГ разработаны ряд усовершенствований этого процесса: сварка погруженной дугой без и с электромагнитным перемешиванием металла сварочной ванны, сквозным проплавлением, двухдуговая и др. [1, 3–7, 9–12, 15–17].

При сварке погруженной дугой конец вольфрамового электрода с помощью специальной принудительной автоматической системы регулиро-

вания напряжения на дуге (изредка вручную) опускается ниже поверхности свариваемого металла. За счет увеличения коэффициента эффективности тепловой мощности дуги удается сваривать за один проход без разделки кромок листы титана толщиной $b \leq 15$ мм, а при двухсторонней сварке — $b \leq 36$ мм. При этом сварные швы с каждой стороны листа выполняют в два прохода без использования присадочной проволоки: первый проход осуществляют погруженной дугой для получения требуемой глубины проплавления; второй — поверхностной дугой для сглаживания шва и придания ему требуемых геометрических размеров. Недостатками указанного способа сварки являются получение шва большой ширины, крупнокристаллическая структура металла, невозможность регулировать его химический состав, а также высокая склонность к порообразованию. Применение способа сварки с электромагнитным перемешиванием позволяет улучшить структуру металла шва и значительно уменьшить его пористость [1, 15, 17].

Для повышения коэффициента наплавки при многослойной односторонней сварке ТИГ в разделку листов титана ($b \leq 50$ мм) разработаны технология и оборудование для сварки двумя вольфрамовыми электродами, расположенными в плоскости, перпендикулярной оси шва. При таком способе сварку листов титана толщиной $b = 50$ мм выполняют за 6...8 проходов с использованием присадочной проволоки ($d_{\text{п}} = 5...7$ мм). Указанный способ сварки нашел применение и для наплавки [5, 16].

Сварка ТИГ сквозным проплавлением позволяет за один проход соединять листы титана толщиной $b \leq 12$ мм. Для получения проплавления типа «замочная скважина» установочная длина дуги должна составлять 0,5...1,0 мм, а режим сварки назначается так, чтобы под дугой по мере ее продвижения образовывалось отверстие, заполняемое жидким металлом. Для усиления шва требуется выполнение второго прохода с использованием присадочной проволоки.

Сваркой ТИГ поверхностной дугой выполняют поворотные и неповоротные стыки трубопроводов, а также вварку труб в трубные доски. В этом случае применяют специализированное оборудование, не используемое при других способах сварки [1, 5, 6, 18].

Для получения неразъемных соединений титана без разделки кромок изделий толщиной $b \leq 10$ мм наряду со сваркой ТИГ применяют плазменную сварку (ПС). При этом используют такие же средства защиты, как и при сварке ТИГ. В переднюю часть сварочной ванны возможно введение присадочной проволоки. При ПС к скорости подачи присадочной проволоки и ее диаметру

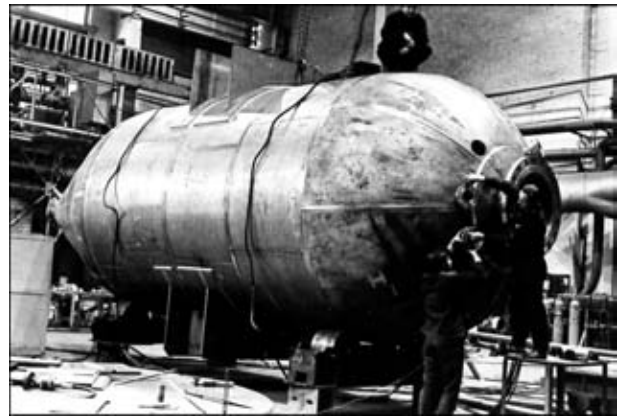


Рис. 7. Изготовление гидролизного аппарата из сплава АТЗ с толщиной корпуса 24 мм

предъявляются менее жесткие требования, чем в случае сварки ТИГ. ПС выполняется с одно- или двухсторонней V-образной разделкой кромок [1, 5, 6, 19].

Для соединения титановых пластин толщиной $b \leq 1,5$ мм применяют микроплазменную сварку (МПС), которую осуществляют на постоянном токе прямой полярности дугой, горячей в непрерывном или импульсном режимах. В качестве плазмообразующего газа используют аргон, защитного газа — гелий или смесь $\text{Ar} + 50...75\% \text{He}$. При сварке изделий из титана толщиной $b \leq 0,3$ мм соединение выполняют с отбортовкой кромок. Средняя рабочая длина дуги при МПС почти на порядок больше, чем при сварке ТИГ, и поэтому при указанном способе сварки допускаются большие отклонения от заданной длины дуги без особого влияния на параметры шва. Для обеспечения процесса стабильного формирования особое значение приобретают форма и размеры соединения [5, 6, 20].

При изготовлении химических аппаратов, например гидролизного (рис. 7) вместимостью 47 м^3 из титана применяют сразу несколько способов сварки ТИГ. При этом следует отметить, что избежать использования ручной сварки ТИГ не удастся. Все швы корпуса аппарата выполнены автоматической сваркой ТИГ погруженной дугой без присадки, швы днищ — ручной сваркой ТИГ с разделкой и использованием присадочной проволоки $d_{\text{п}} = 3...5$ мм из сплава 2В. Сварочные автоматы оборудованы фартуками гусеничного типа, копирующими форму свариваемых поверхностей и обеспечивающими надежную защиту остывающих участков сварного соединения. Защиту обратной стороны шва осуществляли с помощью приспособления, обеспечивающего равномерный поддув аргоном по всей длине свариваемого стыка. Сварку выполняли в два прохода с каждой стороны. Фланцы большого диаметра изготавливали сваркой ТИГ по щелевому зазору с последующей правкой и механической обработкой. Штуцера и люки собирали с корпусом на



прихватках и приваривали ручной сваркой ТИГ с разделкой кромок [1, 5, 6].

Основными дефектами, возникающими при сварке ТИГ титана, являются поры, холодные трещины, удлиненные газовые каналы. Титан и его сплавы не склонны к образованию кристаллизационных (горячих) трещин. Основной причиной снижения долговечности их сварных соединений являются поры. Удлиненные полости образуются в корне швов, выполненных автоматической сваркой ТИГ погруженной дугой в аргоне [1, 5, 6, 21, 22]. Не допускаются дефекты швов в виде трещин, непроваров, прожогов кратера и подрезов, а также швы с синим или серым цветом поверхности. Исправление дефектов (кроме цветов побежалости) осуществляется подваркой. Места расположения дефектов перед подваркой тщательно зачищают, а концы трещин засверливают. Подварку одного и того же места рекомендуется производить не более двух раз с использованием той же технологии сварки ТИГ, что и для сварки изделий.

Для контроля качества и выявления дефектов сварных соединений из титана применяют те же методы, что и при сварке сталей. В процессе изготовления изделий проверяют качество и состояние свариваемых изделий, сварочных материалов, соответствие подготовки кромок и сборки под сварку требованиям технических условий, стандартов и чертежей. При этом должен соблюдаться технологический процесс сварки и термической обработки. Для выбора методов и объема контроля необходимо обоснование их экономической целесообразности [22].

1. *Изготовление и эксплуатация оборудования из титана* / Г. М. Шеленков, В. Е. Блащук, Р. К. Мелехов и др. — Киев: Техника, 1984. — 120 с.
2. *Машиностроение. Энциклопедия. Т. II: Цветные металлы и сплавы* / Под общ. ред. И. Н. Фридляндера. — М.: Машиностроение, 2001. — 880 с.
3. *Melechow R., Tubielewicz K., Blaszyk W. Titan i jero stopy.* — Czestochowa: WPC, 2004. — 397 S.

4. *Блащук В. Е.* Титан: сплавы, сварка, применение // Автомат. сварка. — 2004. — № 3. — С. 39–46.
5. *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов* / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блащук и др. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
6. *Гуревич С. М.* Справочник по сварке цветных металлов. — Киев: Наук. думка, 1990. — 512 с.
7. *Zamkov V. N., Prilutskii V. P., Shevelev A. D.* Metallurgy and technology of welding titanium alloys // *Welding and Surfacing Rev.* — 1992. — 2. — P. 1–39.
8. *Штамповка, сварка, пайка и термообработка титана и его сплавов в авиастроении* / Под ред. А. Г. Братухина. — М.: Машиностроение, 1997. — 600 с.
9. *American welding society: Welding handbook.* — Miami: American welding society, 1998. — Vol. 4. — 621 p.
10. *Блащук В. Е., Шеленков Г. М.* Сварка плавлением титана и его сплавов (Обзор) // Автомат. сварка. — 2005. — № 2. — С. 38–46.
11. *Paton V. E., Zamkov V. N., Prilutsky V. P.* Narrow-groove welding proves its worth on thick titanium // *Welding J.* — 1996. — № 5. — P. 37–41.
12. *Гаврилюк В. С., Измайлова Г. М.* Лазерная сварка титанового сплава OT4 по лазерному резу // *Технология металлов.* — 2005. — № 1. — С. 23–26.
13. *McMasters J. A., Sutherlin R. C.* Update: titanium specification revised // *Welding J.* — 2004. — № 5. — P. 43–47.
14. *Замков В. Н., Прилуцкий В. П.* Способы сварки титановых сплавов // Автомат. сварка. — 2005. — № 8. — С. 45–48.
15. *Сварка с электромагнитным перемешиванием* / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов, А. Н. Брискман, Г. М. Шеленков. — Киев: Техника, 1983. — 127 с.
16. *Замков В. Н., Топольский В. Ф., Кушниренко Н. А.* Двух-дуговая сварка толстолистового титана вольфрамовыми электродами // Автомат. сварка. — 1978. — № 2. — С. 44–47.
17. *Сварка погруженным вольфрамовым электродом сплава BT20 по необработанному кромкам* / Б. И. Долотов, В. И. Муравьев, Ю. Л. Иванов, Б. Н. Марьин // *Свароч. пр-во.* — 1997. — № 7. — С. 25–27.
18. *Блащук В. Е., Шеленков Г. М., Трояновский В. Э.* Сварка труб с трубными решетками теплообменных аппаратов их титановых сплавов // Автомат. сварка. — 2005. — № 9. — С. 40–42.
19. *Плазменная сварка титановых сплавов* / В. Е. Блащук, Л. М. Оноприенко, Г. М. Шеленков и др. // Там же. — 1993. — № 3. — С. 31–33.
20. *Микроплазменная сварка* / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1979. — 248 с.
21. *Троцкий В. А.* Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1977. — 224 с.
22. *Роянов В. А., Зусин В. Я., Самотугин С. Р.* Дефекты в сварных соединениях и покрытиях. — Мариуполь: ПГТУ, 2000. — 184 с.

Peculiarities of utilisation of TIG welding methods for joining titanium and its alloys are considered. Recommendations are given for application of different welding methods and their advantages and drawbacks are noted.

Поступила в редакцию 20.02.2006

СПОСОБЫ ПРОИЗВОДСТВА ПОРОШКОВ С КВАЗИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ДЛЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ (Обзор)

Ю. С. БОРИСОВ, д-р техн. наук, М. Т. ПАНЬКО, канд. техн. наук, В. Л. РУПЧЕВ, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Выполнен анализ современного состояния способов получения порошков квазикристаллических сплавов. Показано, что для использования в настоящее время газотермического напыления наиболее приемлемым является способ распыления расплава сжатым газом, который обеспечивает получение порошков с высоким содержанием квазикристаллической фазы, отличающихся технологичностью (текучестью).

Ключевые слова: газотермическое напыление, покрытие, порошок, квазикристаллическая икосаэдрическая ψ -фаза, способы изготовления, технологичность порошка

Квазикристаллы являются твердыми телами с упорядоченной атомной структурой, характеризующейся наличием поворотной симметрии с осями 5, 8, 10 или 12-го порядков [1]. Многие ученые считают открытие квазикристаллов важнейшим достижением материаловедения XX века. Начиная с 1984 г. учеными разных специальностей из более чем 30 стран мира (например, США, Франции, Германии, Японии) проведены широкие исследования свойств квазикристаллов и областей их применения.

Квазикристаллические материалы имеют ряд специфических свойств. Например, квазикристаллы системы Al–Cu–Fe интересны как материалы с низкой теплопроводностью (на уровне оксидной керамики), имеющие значения коэффициента термического расширения на уровне металлов и высокую твердость, коррозионную стойкость и износостойчивость [2, 3]. Однако работа с квазикристаллами и практическое внедрение их в промышленность значительно усложняются из-за отсутствия в них макропластичности при комнатной температуре, а поэтому в технике они в основном применяются в качестве покрытий.

Одним из наиболее распространенных способов получения таких покрытий является газотермическое напыление порошков. Производительность способов газотермического напыления и качество получаемых покрытий в значительной мере зависят от физических и технологических свойств порошков, которые используются для напыления. В свою очередь, свойства порошков зависят от способа их изготовления.

Целью настоящей работы является анализ существующих способов изготовления порошков с квазикристаллической составляющей.

Способ испарения и конденсации. Основан на испарении нагретого металла или сплава с дальнейшим быстрым охлаждением его в газовой среде или на подложке. Путем варьирования давлением газа, скоростью испарения металла и температурой основы можно управлять процессом получения порошка или компактного слоя с необходимой структурой.

Порошки, которые содержат квазикристаллическую фазу, изготавливают испарением лент из сплавов систем Al–Cu–Fe и Al–Pd–Mn толщиной 50 мкм лучом лазера [4]. Ленты состава $Al_{62}Cu_{25,5}Fe_{12,5}$ и $Al_{70}Pd_{21}Mn_9$ получали спиннингованием расплава в среде аргона. Источником энергии является лазер с длиной волны 248 нм. Лазерный луч фокусировался в пятно размером 0,5...1,0 мм на поверхности мишени, которая вращалась в вакуумной камере, заполненной аргоном. Импульсы продолжительностью 20 нс излучались с частотой 10 Гц, а их энергия во всех экспериментах сохранялась на постоянном уровне (50 мДж/имп.). Полученные порошки собирали на нейлоновом фильтре вакуумной системы.

Исследование структуры порошка системы Al–Cu–Fe показало наличие в ней в основном квазикристаллической ψ -фазы, а также примесей β -фазы. В структуре порошка системы Al–Pd–Mn присутствовала ψ -фаза. Частицы порошка, полученного лазерным испарением, имели форму хлопьев размером 10...20 мкм с ультратонкой зерновой структурой.

Описанный процесс получения порошка является малопродуктивным, а его промышленное использование проблематичным.

Способ испарения и конденсации был применен для получения покрытий системы Al–Cu–Fe с квазикристаллической структурой [5]. Испарение слитка состава $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ осуществляли из медных водоохлаждаемых тиглей в вакуумной камере с помощью электронно-лучевой пушки. Ох-



лаждение происходило при температуре основы 470...1070 К. Установлено, что размер зерен квазикристаллической фазы зависит от температуры основы, при ее снижении (ниже 770 К) он становится меньше 100 нм.

Способ центробежного диспергирования расплава. Он основан на измельчении струи расплава под действием центробежных сил вращающегося диска и дальнейшем затвердевании капель во время полета к стенкам камеры. В работе [6] этот способ применили для получения порошка системы Al–Cu–Fe с квазикристаллической составляющей. Слиток массой в несколько сотен граммов расплавляли в тигле распылительной камеры в среде гелия. При достижении температуры, необходимой для разлива, дно тигля открывали и расплав попадал на диск, вращающийся со скоростью 30000 мин⁻¹. Растекающийся по диску расплав на его краю превращался в капли, которые затвердевали во время полета к стенкам камеры. Полученные порошки содержали не более 30 об. % ψ -фазы, что, по мнению авторов указанной работы, связано с невысокой скоростью охлаждения капель.

Описанный способ получения порошка малопродуктивный. Содержание квазикристаллической ψ -фазы в нем незначительное.

Способ механического легирования. Он состоит в смешивании отдельных элементов или лигатур в виде порошков определенного гранулометрического состава в высокоэнергетических смесительных агрегатах (атриторах, планетарных мельницах и др.) с целью получения композиций однородных смесей или сплавов.

В работе [7] сплавы Al₆₃Cu₂₅Fe₁₂, Al₆₅Cu₂₀Fe₁₅ и Al₇₀Cu₂₀Fe₁₀ получали из порошков алюминия, меди и железа 99,9%-й чистоты путем механического легирования в высокоэнергетической планетарной шаровой мельнице (Fritsch Pulverisette P-5). Обработка в течение 10...30 ч механической смеси, которая отвечала составу Al₆₃Cu₂₅Fe₁₂, способствовала образованию стойкой кристаллической β -фазы. В то же время в двух других сплавах состава Al₆₅Cu₂₀Fe₁₅ и Al₇₀Cu₂₀Fe₁₀ вместе с β -фазой была синтезирована икосаэдрическая квазикристаллическая ψ -фаза. Установлено, что отношение атомных концентраций алюминия и меди+железа при использовании этого способа играет важную роль в образовании квазикристаллической фазы.

В работе [8] механическое легирование осуществляли в планетарной шаровой мельнице AGO-2U, скорость вращения которой составляла 685, 1015 и 1235 мин⁻¹. Порошки алюминия, меди и железа 99,9%-й чистоты с размером частиц менее 150 мкм в массовом отношении, которое отвечает составу Al₆₅Cu₂₅Fe₁₂, загружали вместе

с размольными шарами диаметром 3,5...8,0 мм общей массой 200 г в емкость для смешивания. Масса порошка составляла 10 г. Для предотвращения загрязнения порошка при измельчении вводили поверхностно-активные добавки (бензин, керосин). Установлено, что высокоэнергетическое измельчение содействует образованию неустойчивой нанокристаллической фазы, в которой во время нагрева происходит ряд преобразований, включая взаимодействие с остатками чистых элементов и вторичных интерметаллидных продуктов, а неустойчивая кубическая фаза в результате отжига при температуре 773...873 К превращается в икосаэдрический квазикристалл.

Однако существует большая вероятность загрязнения материала примесями вследствие намола шаров. Для получения большего содержания квазикристаллической фазы необходим дополнительный отжиг.

Способ измельчения слитков. Способ изготовления порошков, которые содержат квазикристаллическую фазу, заключается в выплавке сплава необходимого химического состава и структуры и дальнейшем измельчении слитков до получения частиц необходимого размера.

Для лабораторных исследований слитки небольшой (50...100 г) массы получали плавлением в охлаждаемом медном тигле в высокочастотной печи в аргоне [9, 10]. В работах [9, 11] образцы диаметром несколько миллиметров и высотой несколько сантиметров формировали вытягиванием расплава в кварцевую трубку. Скорость кристаллизации при диаметре трубки 10 мм составляла 250 К/с. Таким образом получали слитки из 47 сплавов систем Al–Cu–Fe, Al–Co–Fe, Al–Co–Ni и др. [9], которые содержат, как правило, несколько фаз. Содержание ψ -фазы в них повышали путем отжига в течение 24 ч при температуре 1085 К, что позволило довести массовую долю квазикристаллической фазы в слитке до 95 % [10]. В работе [12] использовали для измельчения слитки массой 5 кг большого (50 мм) диаметра и описали свойства покрытий, полученных из измельченных порошков. Измельчение осуществляли в механической агатовой ступке. Дюбуа [9] описал технологию получения из расплава слитков Al–Cu–Fe–Cr массой 2 кг с 95 об. % квазикристаллической фазы. Представленные результаты свидетельствуют о возможности применения такого способа для получения порошков в промышленности. Эти слитки измельчали в барабанной мельнице со стальными шарами. Таким способом выпускает порошки французская фирма «Saint-Gobain» под маркой «Cristome» [3].

Способ измельчения слитков для получения порошков применяется в промышленности, однако его существенным недостатком является то, что частицы порошка имеют осколочную форму. Это

определяет его низкую текучесть и снижает технологичность их применения.

Способ самопроизвольного распада струи расплава с охлаждением в воде и измельчением гранул. Он включает следующие этапы: приготовление расплава необходимого химического состава, прохождение его через круглое отверстие, распад струи на отдельные фрагменты в соответствии с законом Рэлея, формирование капель под действием сил поверхностного натяжения и охлаждение капель в воде; высушивание и измельчение гранул порошка до необходимого размера.

Этот способ получения порошка из сплава $Al_{63}Cu_{25}Fe_{12}$ впервые был применен в ИЭС им. Е. О. Патона [13]. В результате получен порошок с квазикристаллической составляющей (от 22 до 43 мас. %), частицы которого имели неправильную осколочную форму и содержали β -, ψ -, λ - и θ -фазы. Причиной этого были низкая скорость охлаждения капель и химическая неоднородность расплава.

Способ распыления (диспергирования) расплава сжатым газом. В настоящее время этот способ, подробно описанный в работе [14], является основным промышленным способом получения порошков алюминия и алюминиевых сплавов.

В работах Сорделета и других исследователей [12, 15] при получении как покрытий, так и опытных спеченных образцов из сплавов системы Al–Cu–Fe с квазикристаллической фазой отдается предпочтение порошкам, распыленным из расплава струей аргона. Скорость охлаждения расплава при газовом распылении достигает $1 \cdot 10^5$ К/с, что почти на два порядка выше, чем слитка в медной охлаждаемой форме. При высокой скорости охлаждения структура порошка тоньше, а состав его более однородный. В отличие от дробленого порошка, частицы которого отличаются неправильной осколочной формой, частицы порошка, распыленного аргоном, имеют сферическую (или почти сферическую) форму, что обеспечивает хорошую его текучесть при нанесении покрытий. Распыление инертным газом предохраняет поверхность частиц порошка от значительного окисления. Так, в порошке $Al_{63}Cu_{25}Fe_{12}$, полученном распылением расплава аргоном, содержание кислорода составляло 0,205...0,065 мас. % для фракций соответственно 0...25 и 75...106 мкм [16]. С увеличением размера частиц содержание кислорода уменьшалось в связи с уменьшением их удельной поверхности, а объемная доля ψ -фазы изменялась от 69 до 55 % вследствие того, что скорость охлаждения мелких частиц выше, чем крупных. Гранулометрический состав порошка регулируется давлением газа. Способ изготовления порошков квазикристаллических сплавов Al–

Cu–Fe распылением расплава инертным газом высокого давления изложен в работе [17].

В ИЭС им. Е. О. Патона испытан способ получения порошка $Al_{63}Cu_{25}Fe_{12}$ распылением расплава сжатым воздухом [13]. В качестве исходного сырья использовали алюминий 99,95%-й чистоты, медь 99,9%-й чистоты и железо 99,7%-й чистоты. Расплав получили индукционным плавлением шихты в графитовом тигле на воздухе с гомогенизирующей выдержкой в течение 15 мин при температуре (1100 ± 30) °С. Для распыления расплава использовали форсунку с кольцевым газовым соплом, подачу расплава осуществляли по центру газового потока.

В распыленном воздухом порошке $Al_{63}Cu_{25}Fe_{12}$ содержание кислорода менялось от 1,50 до 0,63 мас. % для фракций 0...50 и 100...160 мкм. С увеличением размера частиц содержание кислорода понижалось в связи с уменьшением их удельной поверхности. Содержание квазикристаллической ψ -фазы в порошке составляло от 54 до 50 об. % для фракций соответственно 0...50 и 80...100 мкм, поскольку скорость охлаждения мелких частиц выше, чем крупных. Частицы порошка, полученного распылением расплава воздухом, имели неправильную форму.

Порошки, полученные распылением расплава аргоном, по своим физическим и технологическим характеристикам отвечали всем требованиям, предъявляемым к порошкам для газотермического напыления покрытий.

При использовании порошков, распыленных воздухом, снижается производительность процесса напыления вследствие их плохой текучести и ухудшается качество покрытий из-за наличия на поверхности частиц порошка оксидных пленок.

Способ распыления расплава водой высокого давления [14]. Этот способ в промышленности применяют для получения порошков разных металлов и сплавов наряду с газовым распылением расплава. Так, хорошо известный способ диспергирования расплава струями воды высокого давления позволяет повысить скорость охлаждения расплава на порядок по сравнению со способом распыления газом. Этот способ широко используют для получения порошков черных и цветных металлов (например, меди и сплавов на ее основе), однако он не нашел широкого промышленного применения для производства порошков алюминия и алюминиевых сплавов из-за возможного возникновения взрыва при выделении водорода в результате взаимодействия порошков с водой.

При испытании указанного способа получения порошков в ИЭС им. Е. О. Патона из сплава $Al_{63}Cu_{25}Fe_{12}$ [13] при распылении расплава водой высокого давления измельчение свободно истекающей струи расплава, приготовленного по той



же технологии, что и при распылении воздухом, осуществляли отдельными струями воды, расположенными по кольцу вокруг струи расплава под давлением 9 МПа. Полученный порошок высушивали при температуре 200 °С в течение 4 ч. В нем, очевидно, благодаря более высокой скорости кристаллизации получено значительное (69...74 об. %) содержание ψ -фазы по сравнению с порошком, распыленным сжатым воздухом (50...54 об. %).

Содержание кислорода в порошке составляло от 1,95 до 1,60 мас. % для фракций соответственно 0...50 и 100...125 мкм. Как и в случае газового распыления, содержание кислорода уменьшалось с увеличением размера частиц порошка в связи с уменьшением их удельной поверхности. Содержание квазикристаллической фазы в порошке также связано с размером частиц: массовая доля ψ -фазы в порошке мелких фракций больше, чем в порошке крупных фракций в связи с более высокой скоростью охлаждения первого. Частицы порошка имели неправильную форму.

Этот способ изготовления нуждается в доработке в связи с высокими взрывоопасностью процесса и содержанием кислорода в порошке, а также его низкой текучестью.

Таким образом, для газотермического напыления покрытий системы Al-Cu-Fe с квазикристаллической структурой наиболее пригодны порошки, полученные распылением расплава инертным газом.

Сферическая форма частиц порошка, полученного распылением расплава аргоном, способствует его хорошей текучести, что обеспечивает стабильность подачи материала в условиях газотермического напыления. Низкое содержание кислорода на поверхности частиц порошка способствует получению качественных газотермических покрытий.

1. Dubois J.-M. Introduction to quasicrystals. — Berlin: Springer Verlag, 1998. — 392 p.
2. Dubois J.-M. New prospects from potential applications of quasicrystalline materials // Mater. Sci. and Eng. — 2000. — № 294–296. — P. 4–9.

It is shown that powders produced by inert-gas atomisation of metal melt are the better choice for thermal spraying of coatings. Spherical shape of the powder particles and low oxygen content on their surface provide high productivity of the spraying process and improved quality of thermal spray coatings.

Поступила в редакцию 25.09.2006

3. Application of quasicrystalline materials as thermal barriers in aeronautics and future perspectives of use for these materials / A. Sanchez, F. J. Garcia de Blas, J. M. Algaba et al. // Quasicrystals: MRS symp. proc. — Vol. 553. — MRS, Warrendale, PA, 1999. — P. 447–458.
4. Laser ablation synthesis of Al-based icosahedral powders / R. Nicula, A. Jianu, C. Grigoriu et al. // Mater. Sci. and Eng. — 2000. — № 294–296. — P. 86–89.
5. Устинов А. И., Мовчан Б. А., Полищук С. С. Структура и механические свойства Al-Cu-Fe покрытий с наноразмерной квазикристаллической структурой // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии: Сб. науч. тр. — 2004. — 2, № 1. — С. 203–213.
6. Michot G. Production of icosahedral Al-Cu-Fe powders by centrifugal atomization method // Proc. of the 5th Intern. conf. on quasicrystals. — Singapore: World Scientific, 1996. — P. 794–797.
7. Barua P., Murty B. S., Srinivas V. Mechanical alloying of Al-Cu-Fe elemental powders // Mater. Sci. and Eng. — 2001. — A304–306. — P. 863–866.
8. Crystallochemical aspects of solid state reactions in mechanically alloyed Al-Cu-Fe quasicrystalline powders / A. I. Salimon, A. M. Korsunsky, E. V. Shelekhov et al. // Acta Mater. — 2001. — № 49. — P. 1821–1833.
9. Pat. 5652877 U. S. Aluminum alloys, substrates coated with these alloys and their applications / J.-M. Dubois, A. Piranelli. — Publ. 1997.
10. Giacometti E., Guyot P., Baluc N., Bonneville J. Plastic behavior of icosahedral Al-Cu-Fe quasicrystals: experiment and modeling // Mater. Sci. and Eng. — 2001. — A319–321. — P. 429–433.
11. Kang S. S., Dubois J. M. Compression testing of quasicrystalline materials // Phil. Mag. A. — 1992. — 66, № 1. — P. 151–163.
12. Sordelet D. J., Kramer M. J., Unal O. Effect of starting powders on the control of microstructural development of Al-Cu-Fe quasicrystalline plasma-sprayed coatings // J. Thermal Spray Techn. — 1995. — 4, № 3. — P. 235–244.
13. Получение порошков системы Al-Cu-Fe для газотермического напыления покрытий с квазикристаллической структурой / Ю. С. Борисов, М. Т. Панько, Л. И. Адеева и др. // Автомат. сварка. — 2001. — № 1. — С. 45–50.
14. Порошки цветных металлов / С. С. Набойченко, О. С. Ничипоренко, И. Б. Мурашова и др.: Справ. — М.: Металлургия, 1997. — 542 с.
15. Sordelet D. J., Kim J. S., Besser M. F. Dry sliding of polygrained quasicrystalline and crystalline Al-Cu-Fe alloys // Quasicrystals: MRS symp. proc. — Vol. 553. — MRS, Warrendale, PA, 1999. — P. 459–471.
16. Sordelet D. J., Besser M. F., Anderson I. E. Particle size effects on chemistry and structure of Al-Cu-Fe quasicrystalline coatings // J. Thermal Spray Techn. — 1996. — 5, № 2. — P. 161–174.
17. Pat. 5433978 U. S., B 22 F 009/08. Method of making quasicrystal alloy powder, protective coatings and articles / Shield E., Jeffrey, Goldman. — Publ. 18.07.95.



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ

А. М. ЖЕРНОСЕКОВ, В. М. КИСЛИЦЫН, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Установлено, что применение импульсных источников питания дуги с плавной регулировкой параметров импульсов и увеличенной частотой их следования позволяет повысить коэффициент полезного действия электролизера.

Ключевые слова: газогенераторы, водородно-кислородные смеси, электролизер, источники питания, частота импульсов, газопламенная технология

Для получения водорода технической чистоты чаще всего используют электролиз воды, однако во многих случаях промышленное применение электролитического водорода оказывается дороже других горючих газов или водорода, получаемого, например, способами каталитической конверсии водяного пара или реформингом метана. Попытки снизить существенные расходы на транспортировку и хранение запасов водорода путем размещения электролизера у места его потребления оказывались тщетными из-за высокой стоимости электролизера, необходимости в специальном помещении для его размещения, а также высокого уровня текущих затрат.

Широкое применение водорода сдерживается укоровившимся представлением о его особой степени взрывоопасности. Этот тезис был опровергнут в начале 1970-х годов, когда в нашей стране и за рубежом было экспериментально доказано, что при определенных условиях можно обеспечить достаточно высокую степень взрыво- и пожаробезопасности с помощью более простых по конструкции электролизеров водородно-кислородной смеси (гремучей смеси). Первые образцы генераторов водородно-кислородной смеси имели невысокую производительность (до $0,2 \text{ м}^3/\text{ч}$) [1, 2], достаточную для использования в процессах пайки и микросварки изделий электротехнической и электронной промышленности.

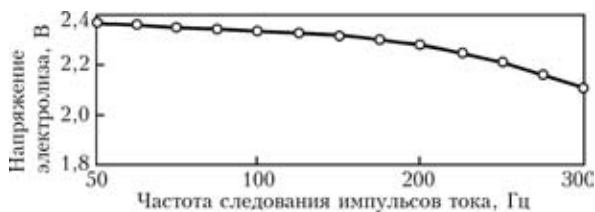
Переход к разработке конструкций газогенераторов производительностью более $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ [3] был осуществлен на основании накопленного опыта их технологического использования. Основные принципы разработки в ИЭС им. Е. О. Патона газогенераторов водородно-кислородной смеси производительностью более $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ [4] заключались в двухблочном исполнении газогенератора (источника питания и электролизера), использовании сварочного источника постоянного тока; разделении полученной смеси на два канала —

чистой гремучей смеси и смеси, обогащенной углеродными добавками. Эту концепцию разработки газогенератора, проверенную в течение десятка лет на многих предприятиях Украины, впоследствии использовали и ведущие зарубежные фирмы [5].

Как показала практика многолетней эксплуатации газогенератора водородно-кислородной смеси А-1803 производительностью до $1,8 \text{ м}^3/\text{ч}$, созданного на основе прототипа ГВК-1,5, его конструкция оказалась наиболее удачной с точки зрения соотношения его рыночной стоимости к величине затрат на изготовление, а также эксплуатационных преимуществ по сравнению с другими конструкциями. Надежность этой конструкции, а также возможность разработки на основе водородно-кислородных смесей экологически чистых технологий позволяет надеяться на перспективность развития газопламенной технологии в этом направлении [6].

Учитывая, что газогенератор А-1803, разработанный более четверти века назад, имел КПД преобразования электрической энергии в химическую не выше 62 %, сегодня появилась возможность улучшить его путем использования в качестве материала электродов никеля вместо низкоуглеродистой стали, снижения плотности тока на электродах и проведения процесса электролиза при давлении до 0,3 МПа. Кроме того, появилась возможность проведения экспериментальной проверки идеи электролиза на повышенных частотах, чему способствовало создание источников питания, разработанных в ИЭС им. Е.О. Патона [7] и хорошо зарекомендовавших себя при импульсно-дуговой сварке конструкций ответственного назначения [8]. Они позволяют плавно регулировать частоту следования импульсов тока от 30 до 300 Гц; длительность импульсов от 1,5 до 5 мс; амплитуду импульсов тока до 800 А; ток сварки от 50 до 315 А (при ПВ = 100 %); напряжение на дуге от 16 до 40 В.

На рисунке представлена экспериментальная зависимость напряжения на электролитической ячейке от частоты следования импульсов тока. Оказалось, что данная зависимость специфична для конкретной конструкции электролитической



Зависимость напряжения электролиза от частоты следования импульсов тока

ячейки, использованной в электролизере А-1803 [3]. Явление снижения напряжения электролиза можно объяснить следующим образом. Из литературных данных [9] следует, что при электролизе водных растворов перенапряжение водорода в основном зависит от материала катода и плотности тока электролиза. Однако, как показывают результаты данного эксперимента, напряжение электролиза существенно зависит и от формы импульсов тока. Поскольку водорода в процессе электролиза водных растворов выделяется в 2 раза больше, чем кислорода, рассмотрим более подробно особенности выделения водорода.

Как известно, для электролиза используют источники постоянного тока, состоящие из трехфазного выпрямителя, который выполнен по схеме Ларионова, или однофазного выпрямителя с двухполупериодным выпрямлением. В процессе электролиза катод практически за несколько десятков секунд покрывается слоем адсорбированного водорода, что сопровождается увеличением напряжения электролиза из-за роста переходного электрического сопротивления на границе металл – электролит. Известно также, что если во время роста пузырька водорода на поверхности катода на некоторое время прервать ток электролиза, то в первый момент времени происходит скачкообразное увеличение потенциала катода, что неизбежно приводит к образованию нового центра адсорбции и перераспределению адсорбированных пузырьков водорода. В ходе этого процесса происходит отрыв от поверхности катода наиболее крупных пузырьков водорода и их естественное или принудительное удаление из электролита. При новом цикле включения тока электролиза выделение водорода наиболее интенсивно будет происходить именно на новых центрах адсорбции, сформировавшихся в

момент выключения тока электролиза, причем при меньшем значении напряжения источника питания. Первостепенное значение в данном случае имеет полное прекращение тока электролиза, достигаемое при падении напряжения до нуля, а не его снижение, вызванное пульсацией, характерной для обычных источников постоянного тока. Очевидно, что наличие незначительного пика отрицательного напряжения также будет способствовать снижению перенапряжения, вызванного формированием на поверхности катода газового подслоя.

Таким образом, экспериментально установлено, что увеличение частоты импульсов тока источника питания с 50 до 300 Гц позволяет повысить КПД электролизера с 62 до 70 %. При дополнительной замене в конструкции электролизера материалов электродов и повышении давления электролиза можно ожидать повышения КПД данной конструкции электролизера до 90 %.

1. *Wasser-Schweisser // Produktion.* — 1972. — № 8. — S. 104.
2. *Кислицын В. М., Мусин А. Г.* Малогабаритные переносные установки для пайки и сварки кислородно-водородным пламенем // *Сварка и пайка элементов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.* — Киев: Знание, 1974. — С. 10–11.
3. *А.с. 507668 СССР.* Электролизер для получения гремучего газа из воды и водных растворов / В. К. Лебедев, А. А. Россошинский, В. М. Кислицын и др. — Оpubл. 1976, Бюл. № 11.
4. *Информационное письмо / АН УССР.* Ин-т электросварки им. Е. О. Патона. — Киев, 1981. — № 2 (1246): Генераторы водородно-кислородной смеси ГВК-1,5 и ГВК-0,2 / В. М. Кислицын, А. Г. Мусин, В. П. Шевченко. — [4] с.
5. *Gas from electrolysis // Newsweek.* — 1988. — March 21.
6. *Письменный А. С., Кислицын В. М.* Перспективы развития газопламенной обработки материалов водородно-кислородными смесями // *Автомат. сварка.* — 1995. — № 2. — С. 39–42.
7. *Источник питания для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом с автоматической стабилизацией сварочных параметров / П. П. Шейко, В. М. Павшук, А. М. Жерносеков, Ю. О. Шимановский // Сварщик.* — 2003. — № 4. — С. 4.
8. *Сварка конструкций летательных аппаратов из алюминиевых сплавов больших толщин / О. Н. Кудряшов, О. М. Новиков, И. В. Алексеев и др. // Свароч. пр-во.* — 2001. — № 12. — С. 31–33.
9. *Якименко Л. М.* Электрохимические процессы в химической промышленности. Производство водорода, кислорода, хлора и щелочей. — М.: Химия, 1981. — 280 с.

It is established that application of pulsed arc power sources with a smooth adjustment of the pulse parameters and increased repetition rate allows increasing the electrolyzer efficiency

Поступила редакцию 11.10.2006



НОВОСТИ



НОВЫЕ ГОРЕЛКИ ОТ ABICOR BINZEL

Фирма ПИИ Бинцель Украина предлагает новые горелки для сварки МИГ/МАГ с воздушным (130...500 А) и жидкостным (300...650 А) охлаждением.



СЕРИЯ	Диапазон нагрузки, А, согласно EN 60 974-7, CO ₂ * ПВ 60%	Диаметр проволоки, мм	Вид охлаждения
ABIMIG® 150 (T), 200 (T), 250 (T), 300 (T), 350 (T), 450 (T)	160...450	0,6...2,4	Воздушное
MB (GRIP) 14, 15, 24, 25, 26, 36, 40, RB 61	160...500	0,6...3,2	
RF 13, 15, 25, 36LC, 36, 45	130...450	0,6...3,2	
ABIMIG® 240 WT, 401/501 (D) WT, 452 (D) WT, 535 W, 645 W	300...600	0,8...2,4	Жидкостное**
MB (GRIP) 240 D, 401/501 (D), 602, RB 610	300...650	0,6...3,2	

* При сварке в среде газовой смеси, предельная допустимая нагрузка уменьшается.
** Рекомендуемая охлаждающая жидкость BTC®15.

ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ, ПОЛНОСТЬЮ ОБЕСПЕЧИ- ВАЮЩИЕ ВОСПРОИЗВО- ДИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ СВАРКЕ



Установки TransPuls Synergic — это полностью цифровые источники питания, управляемые от микропроцессора. Цифровые системы от «Fronius» обеспечивают отличные технологические характеристики при сварке, а также стабильные и воспроизводимые результаты. Благодаря синергическому режиму работать с этими установками чрезвычайно просто. После выбора материала и толщины листа цифровой источник питания автоматически передает запрос во встроенную экспертную базу знаний и обеспечивает полный контроль всего процесса сварки. Наличие встроенного устройства подачи проволоки делает установки TransPuls Synergic 2700 идеальными для портативного развертывания на рабочих площад-

ках, выполнения работ в цехах, а также ремонта и внепланового технического обслуживания. Благодаря многофункциональности эти источники питания можно использовать для сварки МИГ/ МАГ, ТИГ, ручной дуговой сварки металлическим электродом, а также для роботизированной сварки.



Специально для нержавеющей стали, а это материал, требующий особого обращения при сварке, «Fronius» предлагает установку TransPuls Synergic 3200 CrNi. Параметры этой установки предварительно программируются, что позволяет легко выполнять прецизионные работы. Сварочные программы специально разрабатываются для нержавеющей стали, наиболее ответственного из металлов, к сварке которого предъявляются повышенные требования.

СВАРКА МЕДИ СПОСОБОМ ТИГ БЕЗ ПОДОГРЕВА

Медь и медные сплавы, особенно в виде массивных листов, необходимо перед сваркой предварительно нагревать, что известно из учебников и практики. Инженер-сварщик Мартин Поберер опроверг это утверждение. На фирме «Voestalpine Stahl» в Линце (Австрия) специалисты сваривают медь, бронзу и латунь без предварительного нагрева, используя мощные системы MagicWave 5000 для сварки ТИГ.

MagicWave 5000 — эта разработанная «Fronius» сварочная система, используемая в Линце, позволяет обходиться без проблематичного, дорогостоящего и даже невозможного предварительного нагрева.

Цифровая трехфазная система для сварки ТИГ меньше и легче традиционных предшествующих моделей. Выходной ток системы — 500 А. Стабильно высокие выходные параметры и воспроизводимость делают данную систему чрезвычайно под-





ходящей для той роли, которую она играет на предприятии в Линце, представляя собой средство специализированного решения проблем, а именно:

если необходимо выполнить ту же работу, т. е. если снова выбираются те же параметры, результаты сварки будут идентичны полученным при первом применении. В случае использования новых характеристик, например, по специальным материалам, «Fronius» направляет их по электронной почте непосредственно к Мартину Побереру и его коллегам, что значительно экономит время, которое ушло бы на испытания.

Особое внимание Мартин Поберер уделяет созданию и хранению характеристик, полученных при выполнении специализированных работ. При этом возможность отличиться имеют как новички, так и ветераны-сварщики. «Это не только разовое достижение верхних пределов в одном рабочем цикле, — говорит Поберер. — Система работает отлично даже после 10-часовых ремонтных операций на многоамперных медных трубах. Кроме того, мы экономим время на наладочных работах и настройках в случае каких-либо модификаций. Что же касается мобильной сварки в полевых условиях, здесь MagicWave 5000 работает просто великолепно».

СКВОЗНЯКИ НЕ ПОМЕХА

Монтажники, занятые изготовлением стальных конструкций на стройплощадках, при строительстве туннелей, в кораблестроении и строительстве в прибрежной зоне часто работают в экстремальных условиях. Это еще в большей мере касается сварщиков. Часто от резких порывов ветра незащищены не только сварщики, но и зона выполнения сварочных работ. Сквозняки нарушают защитную атмосферу в зоне сварки, которая создается активным газом процесса МАГ. Если газобразная защитная атмосфера сдувается ветром, рабочему, как правило, приходится использовать



Сварка самозащитной порошковой проволокой на рабочем месте в метро (участок со сквозняками)

ручную дуговую сварку, которая менее чувствительна к сквознякам, но одновременно гораздо менее производительна. Инженеры по эксплуатации компании «BVG Berliner Verkehrsbetriebe» (Бер-

линская городская транспортная служба) убедились, что сварка порошковой проволокой может компенсировать эти недостатки.

Они достигли с ее помощью впечатляющего 30%-го увеличения производительности по сравнению с ручной дуговой сваркой. Специалисты качественно сваривают стыки колеи и токопроводящих рельсов в участках метро со сквозняками, используя стандартные МИГ/МАГ системы от «Fronius».

На первом этапе был испытан процесс сварки самозащитной порошковой проволокой (процесс Innershield), затем проведена проверка программного обеспечения для цифрового контролируемого процесса. В последующем были разработаны наборы шлангов горелки для порошковой проволоки. Параллельно с этим сварщики компании BVG изучили этот специальный процесс сварки. И лишь после этого берлинцы были оснащены системами TransSynergis 4000 плюс соответствующим вспомогательным оборудованием. Это дало компании BVG дополнительное преимущество — возможность использовать эту современную цифровую технологическую систему и для других задач по сварке.

Сварка рельсового стыка занимает от двадцати до тридцати минут. Бесперывный процесс работы возможен благодаря специальному оборудованию, которое является первым и главным основанием для обеспечения высокой эффективности при сравнении с ручной дуговой сваркой. Электрически изолированный наконечник сварочной горелки для узких, глубоких разделок, удобные наборы шлангов и возможность «вызова» сварочных параметров на экран горелки — все это позволяет сварщику получить повышенную эффективность и выигрыш во времени.



Сварочное оборудование системы TransSynergis 4000, включающее интегрированный программный комплекс, кабели, устройство для подачи проволоки, набор шлангов, горелку и наконечник к ней, сконцентрировано в едином модуле



Специальный оптимизированный наконечник сварочной горелки и другие компоненты делают стандартный TransSynergis пригодным для использования при сварке самозащитной порошковой проволокой



УДК 621.791(088.8)

ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА*

Резак для кислородной резки металла на жидком горючем, отличающийся тем, что испаритель имеет центральное отверстие и выполнен монолитным, с одной стороны — в виде призмы с четным количеством прямоугольных боковых граней, которые сопряжены скругленными ребрами, и с другой стороны — в виде цилиндра, который отделен от призмы кольцевым пазом, при этом каждая вторая боковая грань призмы имеет сквозное отверстие, над которым выполнен скругленный запирающий выступ, радиус которого и радиус скругленных ребер призмы равны радиусу цилиндра, который соответствует радиусу сопряженной с ними внутренней поверхности наружного мундштука. Приведены и другие отличительные признаки. Патент РФ 2287412. А. К. Никитин, А. Г. Корниенко, Л. В. Бакулин, О. Ф. Ерин (ФГУП «Судоремонтный завод «Нерпа») [32].

Электродный узел установки для электродуговой резки металлов, отличающийся тем, что он снабжен опорами в виде прямоугольных шайб, вертикальными пластинами, зажимными винтами, держателями, планками, в каждой из которых выполнена продольная выемка, болтовыми соединениями и дополнительными электрододержателем, электродом и изолятором, при этом в подвижном основании выполнены два взаимно перпендикулярных пересекающихся выреза, в которые вставлены болты на опорах с вертикальными пластинами, соединенными болтовыми соединениями с держателями, в которых закреплены изоляторы с зажимными винтами, стягивающими планки с продольными выемками, шарнирно соединенные с вертикальными пластинами, причем один из держателей снабжен диэлектрической ручкой, его крепежный болт — втулкой для поворота держателя вокруг оси, а в электрододержателях выполнены отверстия под кабели питания. Патент РФ 2287413. В. Г. Арсеньев, Е. П. Беляев, И. П. Беляева и др. [32].

Способ лазерной модификации поверхности металла или его сплава, отличающийся тем, что предварительно строят градуировочную кривую зависимости цвета модифицированной поверхности образца заданного металла или его сплава от удельной мощности падающего на поверхность упомянутого излучения при монотонном возрастании упомянутой удельной мощности от 10^{-10} Дж/(см²·с) до значения, при котором модифицированная поверхность приобретает черный цвет, и последующее воздействие на упомянутую модифицируемую поверхность ведут при удельной мощности лазерного излучения, соответствующей заданному цвету модифицированной поверхности. Патент РФ 2287414. С. Г. Горный, М. И. Патров, К. В. Юдин (ООО «Лазерный Центр») [32].

Способ пайки алюминия и алюминиевых сплавов, осуществляемый с использованием композиции, отличающийся тем, что в композицию дополнительно вводят алюминиевый порошок, а фторид алюминия используют в чистом виде или в смеси с фторалюминатом калия при следующем соотношении компонентов композиции, мас. %: 30...98 фторсилката щелочного металла; 1...14 фторида алюминия и/или его смеси с фторалюминатом калия; 1...56 алю-

миниевого порошка. Патент РФ 2288080. А. В. Полторыбатько, Д. А. Шаклеин, В. Е. Задов [32].

Вентиль резака для газокислородной резки металлов, отличающийся тем, что маховик с резьбовым поясом, предназначенным для взаимодействия с резьбовым поясом корпуса, снабжен другим резьбовым поясом, предназначенным для взаимодействия с ответным резьбовым поясом, выполненным на штоке, корпус снабжен средством предотвращения проворота штока при вращении маховика, а клапан жестко закреплен на конце штока, при этом резьбовой пояс корпуса выполнен с шагом, превышающим шаг резьбового пояса штока, и резьба поясов имеет одинаковое направление. Патент РФ 2288081. В. С. Суворов, П. А. Левахин (ЗАО ПО «Джет») [33].

Способ сварки, предусматривающий релаксацию остаточных механических напряжений, отличающийся тем, что перед вторым проходом с наплавкой слоя, заполняющего соединение, срезают заподлицо утолщение, образованное с обратной стороны соединяющего слоя, выходящее за пределы соединенных деталей. Патент РФ 2288082. П. Аллер, И. Лежеай (Коммисариат Ал'энержи Атомик, Франция) [33].

Механизм импульсной подачи сварочной проволоки, отличающийся тем, что устройство преобразования постоянной подачи проволоки в импульсную выполнено в виде прикрепленного с помощью оси к хвостовику ролика, расположенного в конусном пазу тракта подачи проволоки, по которому она пропущена со стороны наружной цилиндрической поверхности ролика. Патент РФ 2288083. С. А. Солодский, О. Г. Брунов (Томский политехнический университет) [33].

Способ лазерной резки, отличающийся тем, что закрепленную заготовку растягивают, создавая растягивающие напряжения, которые определяют по соотношению $\sigma_p \chi \leq \sigma_y G V$, где σ_p — растягивающие напряжения, создаваемые в заготовке, МПа; χ — температуропроводность материала заготовки, мм²/с; σ_y — предел упругости материала заготовки, МПа; G — среднестатистический предел изгиба заготовки, мм; V — скорость резки, мм/с. Патент РФ 2288084. В. В. Исаков, А. А. Швецов (ФГУП «ММПП «Салют») [33].

Бесшнуровый паяльник, у которого узел жала запитывается с помощью средства электропитания, содержащий два электрода, каждый из которых имеет электрическое удельное сопротивление 1500 мкОм·см или более, теплопроводность, меньшую, чем 10 британских тепловых единиц в час на футградус Фаренгейта (БТЕ/ч·фут·F) (17,3073 Вт/м·K), или равную этой величине, прочность на изгиб, по меньшей мере, примерно 1500 фунтов-сил на квадратный дюйм (фн·с/д²) (10,343 кПа) и плотность примерно от 1,5 до 1,75 г/см³, и каждый электрически изолирован от другого изолятором, расположенным между электродами, причем каждый из электродов имеет конфигурацию, обеспечивающую отдельное электрическое соединение с положительной и отрицательной клеммами средства электропитания. Патент РФ 2288818. Д. Аксинте, Г. Аксинте (Хайперкон Инновейшнз Инк., США) [34].

* Приведены сведения о патентах, опубликованных в бюллетене РФ «Изобретения. Полезные модели» за 2006 г. (в квадратных скобках указан номер бюллетеня).



Регулируемый источник питания для ручной дуговой сварки, отличающийся тем, что вторичная обмотка трансформатора содержит дополнительную вольтодобавочную секцию, к которой подключены два тиристора, управляемые системой импульсно-фазового управления, содержащей двух-пороговый компаратор, вход которого подключен к выходу источника питания, а выход — к входу блокировки импульсов системы импульсно-фазового управления. Патент РФ 2288819. В. П. Кузнецов, С. В. Рудько (ГОУВПО «КнАГТУ») [34].

Способ управления механизмом импульсной подачи сварочной проволоки, отличающийся тем, что в качестве управляющего сигнала используют сигнал датчика усилия сварочной проволоки в направляющем канале сварочного шланга и датчика шага подачи, а импульс производят в момент достижения сварочной проволокой в направляющем канале шланга энергии, соответствующей оптимальному ускорению движения сварочной проволоки, при этом частоту следования импульсов определяют настройкой датчика усилия, скоростью подачи проволоки и шагом, заданным датчиком шага подачи сварочной проволоки. Патент РФ 2288820. С. А. Солонский, В. Т. Федько, О. Г. Брунов (Томский политехнический университет) [34].

Способ дуговой сварки покрытым электродом вертикального шва методом «сверху вниз», включающий электродинамическое воздействие на металлическую и шлаковые ванны, затекающие внутрь козырька покрытия на торце электрода, образующегося при отставании плавления электродного покрытия от плавления электродного стержня, отличающийся тем, что электродинамическое воздействие осуществляют путем увеличения сварочного тока с момента начала короткого замыкания, вызванного затеканием металлической или шлаковой ванны внутрь козырька покрытия на торце электрода, при этом в момент снижения напряжения на дуге ниже 10...14 В сварочный ток увеличивают в 1,5 раза от установленного, а при сохранении короткого замыкания свыше 30 мс дополнительно увеличивают сварочный ток в 1,75...2,0 раза от установленного и при восстановлении дугового разряда сварочный ток восстанавливают до установленного значения. Патент РФ 2288821. В. С. Мильютан, А. А. Морозов, А. В. Дмитриенко (ЗАО «Уралтермосвар») [34].

Способ получения изделий с внутренними полостями, отличающийся тем, что предварительно во внутреннюю полость трубчатого спирального полостеобразующего элемента помещают заряд взрывчатого вещества, выполненный, например, в виде детонирующего шнура, закладываемого во внутреннюю полость трубчатого полостеобразующего элемента до его навивки, причем на свариваемых поверхностях внешнего и внутреннего трубчатых элементов предварительно выполняют резьбу, а процесс сварки взрывом осуществляют перемещением фронта детонации по винтовой линии. Патент РФ 2888822. С. А. Шестаков, В. И. Пындак (Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет) [34].

Способ сварки плавлением, отличающийся тем, что импульсным магнитным полем воздействуют на зону кристаллизации расплавленного металла сварного шва с периодичностью импульсов разряда 0,5...2 с. Патент РФ 2288823. В. А. Глушечков, А. Ю. Иголкин, Н. П. Родин и др. (Самарский госаэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева) [34].

Способ изготовления тавровых элементов ортотропной плиты, отличающийся тем, что один конец размещенного на настильном листе ребра жесткости закрепляют неподвижно,

а второй конец устанавливают с возможностью осевого перемещения и к нему прикладывают растягивающее усилие с напряжением, не превышающим предела текучести материала ребра жесткости, после чего сварку ведут сплошным швом со стороны неподвижно закрепленного конца ребра жесткости. Патент РФ 2288824. И. И. Муравьев, С. В. Гурьев [34].

Установка для термической резки неповоротных труб, отличающаяся тем, что вытяжной кожух, в верхней части которого расположена горловина с наклонным фланцем, выполненной П-образной формы и установлен с возможностью перемещения на катках по направляющим брускам, закрепленным на опорных стойках вдоль оси установки, от закрепленных по обе стороны от него двух силовых цилиндров. Патент РФ 2288825. В. В. Машечков, Б. И. Самохин, О. М. Фартушный, В. Д. Малютин (ОАО «Электростальский завод тяжелого машиностроения») [34].

Способ подготовки стыков труб под сварку при замене дефектного участка магистрального трубопровода, отличающийся тем, что разметку концов труб производят по торцам фальш-трубы с телескопически изменяемой длиной, монтируемой первоначально в сжатом виде между концами труб, а затем надеваемой на трубы путем ее разведения с обеспечением отсутствия зазоров между внутренней поверхностью фальш-трубы и наружными поверхностями концов труб, при этом длину ремонтной «катушки» определяют по длине фальш-трубы после ее монтажа на концах труб. Патент РФ 2288826. Е. М. Кирич, М. Н. Краснов (Пензенский ГТУ) [34].

Способ подготовки кромок труб под сварку, отличающийся тем, что торец одной из свариваемых труб обрабатывают резцом под углом 90° к ее оси, а торец второй трубы обрабатывают изнутри под углом 90° к ее оси и оставляют в верхней части торца кольцевой выступ, толщиной и длиной не более 4 мм, затем раскатным роликом этот кольцевой выступ отгибают наружу под углом от 45 до 90° по отношению к оси трубы, а полученный отогнутый выступ протачивают и придают ему в поперечном сечении форму присадочного выступа в виде равнобедренного треугольника, или равнобедренной трапеции, или прямоугольника, после чего в торце второй трубы под присадочным выступом протачивают цилиндрическую полость с внутренним диаметром, равным наружному диаметру торца первой трубы. Патент РФ 2288827. А. Н. Семенов, В. Н. Тюрин, В. П. Гордо, Г. Н. Шевелев (ФГУП «НИКИ энерготехники им. Н. А. Доллежалея») [34].

Способ фрикционной сварки с перемешиванием материала заготовок, отличающийся тем, что перед вводом в начальный участок места соединения сварочного инструмента, состоящего из двух функциональных частей, — корпуса с опорным буртом и установленного в нем рабочего стержня с возможностью съема и регулирования перемещения по оси — уплотняют вращающимся опорным буртом стык свариваемых заготовок усилием в 2...5 раз меньше потребного для данной толщины материала, а прихваточный шов выполняют, вводя вращающийся рабочий стержень на глубину 0,2...0,5 толщины свариваемого материала, поступательно перемещая вращающийся сварочный инструмент вдоль стыка свариваемых заготовок по всей длине стыка, при этом при сварке продольных швов затем возвращают сварочный инструмент вне полученного прихваточного шва вновь к началу шва, вводят вращающийся сварочный инструмент на полную глубину сварки с созданием полного сварочного усилия и поступательно перемещают сварочный инструмент по всей длине свариваемого стыка до образования сварного шва. Патент РФ 2289496. В. А. Половцев, Г. В. Шилло, Н. В. Макаров,



Д. Ф. Главочевский (ФГУП «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева») [35].

Припой для пайки ювелирных сплавов палладия 850 пробы, содержащий палладий, медь и кремний при следующем соотношении компонентов, мас. %: 85,0...85,5 палладия; 12,0...13,0 меди; 2,0...3,0 кремния. Патент РФ 2289497. А. В. Ермаков, Л. Г. Гроховская, И. Б. Клюева, Г. Ф. Кузьменко (ОАО «ЕЗОЦМ») [35].

Активирующий флюс для дуговой сварки, отличающийся тем, что он дополнительно содержит металлический порошок или смесь металлических порошков, выбранных из группы хром, никель, титан при следующем соотношении компонентов, мас. %: 30...30 гексафторалюмината лития; 20...30 диоксида титана; 10...20 оксида алюминия; 10...20 хлорида кальция; 10...20 металлического порошка. Патент РФ 2289498. С. Г. Паршин [35].

Способ пайки лопаток спрямляющего аппарата компрессора турбореактивного двигателя, отличающийся тем, что пайку осуществляют при давлении газа менее $1 \cdot 10^{-2}$ Па, а в качестве металлического припоя используют алюминиевый сплав, содержащий магний, а также кремний в количестве не более 0,3 мас.%. Патент РФ 2290285. Ж.-Ф. Д. Клемен (Снекма Мотер, Франция) [36].

Способ сварки плавлением сталей с титаном и его сплавами через промежуточный наплавленный слой (варианты), отличающийся тем, что промежуточный слой получают многослойной последовательной наплавкой на титан или его сплавы слоя ниобия, не менее двух слоев ванадия, слоя ниобия, не менее двух слоев медного сплава, после чего полученный многослойный промежуточный слой сваривают со сталью. Патент РФ 2290286. И. В. Горынин, В. В. Рыбин, А. В. Баранов и др. (ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей») [36].

Способ обрезки деталей с криволинейным контуром, отличающийся тем, что обрезаемую деталь размещают между элементами оснастки, содержащей ложемент, закрепляемый на основании рабочего стола, и шаблон, снабженный ручкой и направляющей вдоль его контура, упирают сопло плазмотрона сбоку в направляющую и производят собственно обрезку детали по внешнему контуру направляющей путем скольжения сопла относительно последней с одновременной ориентацией оси плазмотрона перпендикулярно плоскости обрезаемой детали, при этом ложемент, шаблон и обрезаемая

деталь имеют идентичную объемно-пространственную форму и подобны друг другу, контур ложемента меньше контура шаблона, а контур последнего меньше контура детали эталонных размеров, причем в качестве ложемента и шаблона используют готовые одноименные детали, полученные путем эталонной обрезки их и последующей обработки краев. Патент РФ 2290287. С. Р. Аманов, А. В. Каргин (ОАО «АВТО-ВАЗ») [36].

Износостойкий наплавочный материал, отличающийся тем, что он дополнительно содержит феррохром, феррованадий и смесь плавящихся флюсов АН-20 и АН-348 А (1:1) при следующем соотношении компонентов, мас. %: 48...51 борид вольфрама; 28...29 феррохрома; 17...18 феррованадия; остальное смеси плавящихся флюсов. Патент РФ 2290288. В. Д. Орешкин, П. В. Попов (ВолГАСУ) [36].

Способ изготовления пластинчатого электрода для электродуговой сварки неподвижным плавящимся электродом, отличающийся тем, что формирование электроизоляционного покрытия осуществляют в два этапа, при этом на первом этапе последовательно на каждую поверхность сердечника накладывают соответствующую маску со сквозными отверстиями, повторяющую форму поверхности и имеющую толщину, равную толщине формируемого электроизоляционного покрытия, заполняют сквозные отверстия в каждой маске электроизоляционным материалом на 0,2...0,9 толщины соответствующей маски, накладывают на каждую маску пластину, имеющую форму, повторяющую форму поверхности сердечника, а после прикладывания к пластинам сжимающей нагрузки осуществляют операцию сушки путем помещения полученной и находящейся под действием сжимающей нагрузки сборки в печь. Приведены и другие отличительные признаки. Патент РФ 2290289. В. О. Бушма, Д. В. Калашников [36].

Способ сварки кольцевых стыков емкостей, отличающийся тем, что перед сборкой кромки свариваемых деталей нагревают наружным гибким нагревательным элементом и в нагретом состоянии свободно надвигают на собранное вне емкости подкладное кольцо до полного контакта торцевых поверхностей свариваемых деталей, отключают нагревательный элемент и полученную сборку охлаждают до комнатной температуры, после чего выполняют сварку кольцевого стыка и удаляют подкладное кольцо. Патент РФ 2290290. В. А. Половцев, В. М. Розенцвайг, С. Д. Кошелев (ФГУП ГКНПЦ им. М. В. Хруничева») [36].



По
зарубежным
журналам*

RIVISTA ITALIANA DELLA SALDATURA (Италия) 2006. — An. LVIII, № 3 (итал. яз.)

Magnasko M., V. van der Mee. Расходуемые материалы для дуговой сварки сталей, эксплуатирующихся при низких температурах, с. 357–366.

Pezone A., Villosio G. Новейшие технологии процессов сварки — современное состояние и тенденции с целью повышения производительности и надежности, с. 369–373.

Missori S., Sili A. Новейшая технология лазерной сварки для планировки листового проката, с. 375–386.

Marconi G. P. et al. Передовая методика определения остаточных напряжений при сварке — рентгеноструктурный

анализ. Примеры применения на подвесных кронштейнах, с. 389–394.

Atzori B. et al. Новый расчетный метод оценки усталостной долговечности угловых сварных соединений конструкционной стали, с. 395–401.

Wissling M. Методы расчета клеевых соединений, выполненных гибридными лучами и используемых в автомобильной и авиационной промышленности, с. 403–412.

SCHWEISSEN und SCHNEIDEN (Германия) 2006. — № 3 (нем. яз.)

Продолжается затишье на мировом рынке промышленных роботов, с. 110.

Nitschke A. Падение динамики немецкого экспорта в 2006 г., с. 111–112.

Склеивание экономит вес транспортных средств, с. 116–117.

Matthes K.-J. et al. Лазерное диспергирование SiC в сплавах алюминия для защиты от износа, с. 119–122.

Riedel F., Lang H. Комбинация сварки трением и деформации в гибридном способе производства, с. 123–130.

Ху Р. Локальная обработка с целью повышения вибрационной прочности точечных сварных соединений на тонких высокопрочных листах, с. 131–136.

Сертификация согласно EN 729 — состояние развития и тенденции, с. 138–140.

Работа службы информации — обзор литературы «Сварка и родственные технологии»

Склеивание металлов и композитных материалов

Холодное напыление меди — оптимизация процесса

Плазменно-автогенная гибридная резка

Штампованная клепка и гибридное соединение кузовов

Инновации для гибридных конструкций — состояние в сварке алюминия

Новые процессы лазерного соединения смешанных соединений алюминий – сталь

Сварка МИГ/МАГ сплюсненной электродной проволокой

Сварка тонких листов порошковой проволокой в защитном газе и под флюсом

Защитное покрытие с содержанием твердых материалов, необходимых для данной нагрузки

Актуальное состояние разработки и производства сварочной проволоки из легких металлов

Влияние защитных газов при сварке легких строительных материалов

Присадочные материалы для высокопрочных сталей в изготовлении транспортных средств, с. 141–147.

Плазменный луч — ошеломляющее разнообразие применения, с. 147–148.

Обработка поверхностей и термообработка — коллоквиум в Хемнице, сентябрь 2005 г., с. 149–150.

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



SCHWEISSEN und SCHNEIDEN (Германия) 2006. — № 7 (нем. яз.)

Исследовательский проект REFRESH — увеличение долговечности существующих и новых стальных сварных конструкций, с. 334–335.

На выставке «Алюминий 2006» виден прогресс в области сварки, с. 335–336.

Экономичная лазерная сварка труб, с. 340–341.

Инновации в области резки в мостостроении, с. 341–342.

Ehrenstein G. W., Kunkel R. Формирование структуры шва при вибрационной сварке, с. 345–349.

Dilthey U., Ohse P. Контактная сварка окрашенных стальных листов, с. 350–354.

Eppel K. et al. Коррозия магниевых сварных соединений, с. 355–363, 371.

Загадка маленького произведения искусства — пайка или сварка, с. 364–366.

Дуга — неисчерпаемый потенциал технологии, с. 367–368.

Сварка в аппарато- и сосудостроении — актуальные, необходимые для практики знания, с. 368–376.

SCHWEISSEN und SCHNEIDEN (Германия) 2006. — № 8 (нем. яз.)

Изготовление трубчатых изделий в соответствии с требованием клиентов, с. 386–387.

Экономичное производство мелких серий, с. 388–389.

Bach F.-W. et al. Меры, снижающие внутренние напряжения плоских паяных соединений в микросистемной технике, с. 398–407.

Wesling V. et al. Характеристики вибрационной прочности сплавов ковкого алюминия, сваренных высокочастотной сваркой, с. 408–411.

Работа службы информации — обзор литературы «Сварка и родственные технологии», с. 412–418.

Термическое напыление — присадочные материалы и области применения в котлостроении, с. 412.

Улучшение свойств деталей путем наплавки сплавов, упрочненных твердыми материалами при их различном содержании, с. 412.

Термическое напыление в свете времени, с. 412.

Безопасность процесса термического напыления на примерах, с. 412.

Нанесенные термическим напылением покрытия — примеры применения, с. 414.

Разработка и испытание новых сопел для плазменного напыления в атмосфере, с. 414.

Производительная 2D-лазерная резка, с. 414.

Плазма для толстых листов, с. 414.

Поведение сварных соединений высокожаропрочных 9%Cr-сталей при длительной нагрузке, с. 416.

Сварка МАГ специальных высокопрочных строительных сталей порошковой проволокой, с. 417.

Свариваемость и сварка чугуновых материалов, с. 417.

Новые процессы соединения без высокого нагрева при ремонте чугуновых деталей, с. 417.

Применение S890 для напорной шахты гидроэлектростанции — металлургические исследования, с. 417.

Вопросы и ответы по стандарту DIN EN ISO 15614-1:2004 «Требования и аттестация способов сварки», с. 420–421.

Разработан глобальный стандарт по аттестации сварщиков стали, с. 421–425.

SCHWEISS-& PRÜFTECHNIK (Австрия), 2006. — № 4 (нем. яз.)

Auberger G. SOFIA — сварная стальная конструкция стала летательным аппаратом, с. 51–54.

Годичное собрание Общества неразрушающего контроля Австрии, с. 55–56.

В г. Грац в 2008 г. планируется проведение ассамблеи МИС, с. 60–61.

SCHWEISS-&PRÜFTECHNIK (Австрия) 2006. — № 7 (нем. яз.)

Сварка титановых материалов, с. 99.

Установка для сварки трением с перемешиванием, с. 104.

Фирма «Фрониус» делает ставку на цифровую сварочную технику, с. 1.

SCHWEISS-&PRÜFTECHNIK (Австрия) 2006. — № 8 (нем. яз.)

Сварка трением с перемешиванием алюминия в серийном производстве для соединения профилей с листом, с. 115–117.

Производство трубчатых изделий, с. 117–118.

Инновация фирмы «Cloos» в области робототехники, с. 119–120.

SCHWEISS-&PRUFTECHNIK (Австрия) 2006. — № 9 (нем. яз.)

Наплавка деталей с целью защиты от износа. Конференция в Галле, Германия, май 2006, с. 131–134.

Muller T. Неразрушающий контроль материала деталей качения при ремонте, с. 139–140.

Техника измерения — фактор ненадежности — человек, с. 145.

Выставка «Альтернатива технологиям соединения в области высокой производительности» выставка в Галле в октябре 2006 г., с. 146.

SUDURA (Румыния) 2006. — Vol. XVI, № 3 (рум. яз.)

Rusan T., Safta V. Явление ликвации в искусственно смоделированной зоне термического влияния твердого раст-

вора трехкомпонентного суперсплава на основе Ni-Cr-Co, с. 5–9.



Dumbrava D. et al. Аналитический и экспериментальный метод определения термического КПД при дуговой сварке, с. 11–16.

Wesling V. et al. Дополнительная наплавка продольных сварных труб с помощью плазменной сварки и порошок, с. 17–20.

Simler H. et al. Большой потенциал применения плазменно-дуговой резки с жесткими размерными допусками. Ч. 2, с. 21–22.

Kuriykov Y. et al. Вибрационная сварка с подогревом инфракрасным излучением, с. 23–24.

Von Strombeck A. Новые области промышленного применения сварки трением с перемешиванием, с. 26–29.

Vanschen W. Внутренняя наплавка с помощью лазерной сварки с подачей порошкового флюса, с. 32–36.

Tatter U. Зажимание газового шланга с помощью изгиба в случае опасности, с. 38–39.

SUDURA (Румыния) 2006. — Vol. XVI, № 4 (рум. яз.)

Miclosi V. Металлургические аспекты, касающиеся диапазона достоверности аттестации сварочных технологий в зависимости от толщины материала согласно стандарту ISO 15614:2004, с. 5–16.

Thomas W. M. et al. Переходные соединения в разнородных материалах, с. 17–21.

Rusan T., Safta V. Влияние термообработки после сварки на свойства ЗТВ твердого раствора трехкомпонентного суперсплава на основе Ni–Cr–Co, с. 30–37.

Simler H. et al. Большой потенциал применения плазменно-дуговой резки с жесткими размерными допусками. Ч. 3, с. 38–39.

Jungling R., Titze M. Твердая наплавка сваркой трамвайных рельсов с нанесением износостойких слоев, с. 41–43.

WELDING and CUTTING (Германия) 2006. — № 3 (англ. яз.)

Высокостабильная дуга при сварке алюминия за счет легирования кислородом, с. 136–137.

Сварка трением с перемешиванием открывает новые области применения, с. 138.

Характеристики ползучести сварных стальных листов P92 при разных режимах термообработки и сварки при 600 °C, с. 148–153.

Fuad M. et al. Возможности автоматизации процессов сварки ТИГ и МИГ, с. 154–163.

Dilthey U. et al. Сварка изделий сложной формы, с. 164–176.

Jenicsek A. Сравнение методов приварки шпилек и тонколистовой стали с покрытием, с. 177–182.

WELDING and CUTTING (Германия) 2006. — № 4 (англ. яз.)

Weigert J. Производство упрочненных волокнами поршней дизельных двигателей с помощью электронно-лучевой сварки, с. 190–191.

KINETIKS — следующее поколение установок для холодного напыления, с. 192–193.

Keimig B. Роботизированная сварка плавящимся электродом в среде инертного газа автоматически включаемых поворотных систем защиты, изготовленных из алюминия, с. 198–200.

Woollin P. et al. Коррозионная усталость сварных нержавеющих сталей, применяемых для глубоководных подъемников, с. 204–209.

Dilthey U. Модификация электрошлакового процесса открывает новые возможности наплавки, с. 215–220.

Galloway A., McPherson N. Влияние состава защитного газа на удержание азота в металле шва аустенитной нержавеющей стали 316LN, с. 225–230.

Siebert M., Schlimmer M. Процесс надежного клевого соединения круглых штекерных узлов, изготовленных из металлических материалов в любых производственных условиях, с. 231–236.

ZVARANIE-SVAROVANI (Словакия) 2006. — Roc. 53, № 3 (слов. яз.)

Shiga Ch. et al. Улучшение сварных соединений благодаря использованию присадочных материалов с низкой температурой превращения мартенсита, с. 65–70.

Budig B. Эффективный процесс сварки МИГ/МАГ без переноса металла короткими замыканиями под названием «EWM-forceArc», с. 71–72.

Kovacik M., Kucik P. Ультразвуковой метод TOFD (метод определения полета дифракционной волны) для определения глубины дефектов, с. 75–78.

Hudak J. Рабочая проверка сварщиков — необходимое предварительное условие для производства, реконструкции и ремонта железнодорожных вагонов, с. 79–81.

Karkalikova-Sucharovova I., Jajcay A. Мост через Дунай в Братиславе, начиная с римских времен до нашего времени, с. 82–87.

ZVARANIE-SVAROVANI (Словакия) 2006. — Roc. 53, № 4 (слов. яз.)

Juhas P. Стандартные допуски по поперечным сечениям сварных конструкций, с. 97–103.

Kalna K. Определение диапазона и частоты процедур контроля и техобслуживания на основании риска разрушения, с. 104–109.

Eckhardt E., Zatko M. Оптический метод наблюдения с помощью индентора (TIV), с. 111–113.

Преимущества и изображения В, С и S при ультразвуковом контроле массивных поковок, с. 115–117.

НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ!

В марте 2007 г. исполнилось 70 лет доктору технических наук, заведующему отделом эксплуатационной прочности сварных конструкций ИФТПС СО РАН, заслуженному работнику народного хозяйства Республики Саха (Якутии) Александру Прокопьевичу Аммосову.

А. П. Аммосов внес весомый вклад в развитие физико-механических основ обеспечения хладостойкости и эксплуатационной прочности сварных соединений элементов металлоконструкций и техники Севера, магистральных трубопроводов систем, а также в развитие методов математического моделирования и прогнозирования миграции нефтепродуктов и радионуклидов при техногенном загрязнении грунтов в условиях вечной мерзлоты.

В настоящее время А. П. Аммосов полон творческих замыслов и идей. Он занимается актуальными вопросами технической диагностики, разработки и совершенствования нормативных документов ГОСТов и СНИПов, направленных на повышение эксплуатационной прочности сварных соединений элементов металлоконструкций и техники, магистральных трубопроводных систем газо-, нефте-,

топливо-, тепло- и водоснабжения, емкостей для хранения нефтепродуктов, сжиженных газов и других, эксплуатируемых в условиях Севера. Занимается вопросами тепловых и массообменных процессов, очистки грунтов и грунтовых вод в районах Якутии от различных техногенных загрязнений, а также в области повышения коррозионной стойкости сварных швов различных объектов жизнеобеспечения (котлов, газопроводов, высотных сооружений, водоводов, систем горячего и холодного водоснабжения и т. д.), работающих в экстремальных условиях Севера.

А. П. Аммосов уделяет много внимания подготовке кадров для системы профтехобразования, Якутского государственного университета, Якутского государственного инженерно-технического института, а также для производства.

Среди его учеников пять кандидатов, один доктор, немало инициативных педагогов, научных работников и производственников, успешно работающих во многих организациях Якутии. Он является автором более 200 научных трудов, включая две монографии и два авторских свидетельства.



В марте исполнилось 70 лет старшему научному сотруднику Института электросварки им. Е. О. Патона, кандидату физико-математических наук Елене Андреевне Великоиваненко.

В Институте электросварки Е. А. Великоиваненко работает с 1964 г. в отделе математических методов исследования физико-химических процессов при сварке и спецметаллургии. Здесь она специализируется на численном решении термоупругопластических задач, моделирующих процесс формирования сварочных напряжений и деформаций в различных конструкциях. Уже первые работы Е. А. Великоиваненко в этом направлении в конце 1960-х годов показали значительные возможности численных методов в сочетании с электронно-вычислительной техникой при исследовании указанного типа задач.

В 1973 г. Е. А. Великоиваненко защищает кандидатскую диссертацию по методическим вопросам численного решения двухмерных задач термопластичности применительно к сварочному нагреву.

Непрерывное развитие вычислительной техники обуславливает синхронное развитие во всем мире методов математического моделирования во всех областях знаний, в том числе и в термомеханике сварочных процессов. Указанное обстоятельство постоянно учитывается в творческой работе Е. А. Великоиваненко при создании новых версий системы компьютерных программ «Weldpredictions», позволяющих, в частности определять уровень нерелаксированных остаточных напряжений в эксплуатируемых ответственных сварных конструкциях. Последнее имеет большое значение при оценке ресурса безопасной эксплуатации указанных конструкций в условиях риска хрупких, усталостных и коррозионных разрушений.

Использование современных подходов механики разрушения позволило показать, что нерелаксированные остаточные напряжения могут являться одним из определяющих факторов, лимитирующих ресурс безопасной эксплуатации. На основе таких прогнозов были выработаны обоснованные рекомендации, позволяющие предупредить аварийные ситуации и сохранить значительные материальные средства за счет исключения необоснованных простоев и ремонтов на таких важных объектах, как атомная энергетика (Южно-Украинская АЭС —

2003 г., Запорожская АЭС — 2005 и 2006 гг., Хмельницкая АЭС — 2007 г.) и многих других.

Е. А. Великоиваненко является автором свыше 120 опубликованных работ (в том числе и одной монографии) по термомеханике сварочных процессов. Методические подходы и компьютерные программы, разработанные Е. А. Великоиваненко, ус-

пешно используются специалистами в целом ряде организаций как Украины, так и за рубежом.

Свой 70-летний юбилей Е. А. Великоиваненко встретила полная творческих планов и намерений для их осуществления. Она пользуется заслуженным авторитетом и вниманием широкого круга специалистов в области термомеханики и прочности сварных соединений.

Поздравляем юбиляров и желаем им больших творческих успехов, крепкого здоровья, долголетия, личного счастья и благополучия.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Редколлегия и редакция журнала «Автоматическая сварка»

К 75-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ В. Ф. ЛАПЧИНСКОГО

В апреле 2007 г. исполнилось 75 лет со дня рождения известного украинского ученого в области космических технологий, лауреата Государственной премии Украины и Премии им. Е. О. Патона НАН Украины кандидата технических наук Всеволода Федосьевича Лапчинского.

После окончания Киевского политехнического института в 1957 г. В. Ф. Лапчинский начал свою трудовую деятельность в «Укртяжпромэлектропрокте».

С 1959 г. и до самой кончины в 1997 г., он работал в Институте электросварки им. Е. О. Патона, где прошел путь от инженера-экспериментатора до руководителя одного из ведущих научных отделов — отдела космических технологий.

В начале своего творческого пути В. Ф. Лапчинский занимался изучением переноса металла при дуговой сварке в защитных газах. Им был предложен и разработан способ импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом, который нашел широкое применение в промышленности.

С 1969 г. В. Ф. Лапчинский начинает работать в новом для себя направлении — сварка и родственные технологии в космосе. С 1981 г. он руководил лабораторией, а с 1985 г. — отделом космических технологий. С его участием подготовлен ряд важнейших экспериментальных исследований на борту летающей лаборатории и непосредственно в космосе по выполнению процессов сварки, резки, пайки и нанесения покрытий, изучению особенностей кристаллизации и поведения многофазных сред жидких металлов в условиях микрогравитации.

В. Ф. Лапчинский участвует в выполнении технологических исследований и разработке уникальной аппаратуры, в частности, установок «УРИ», «Универсал», «Испаритель», «Янтарь» и других, на которых впервые в мире были проведены эксперименты по сварке, резке, пайке и нанесению покрытий в открытом космосе.

Научная и инженерная деятельность В. Ф. Лапчинского была направлена также на решение задач в области разработки технологии и оборудования для монтажа и ремонта крупногабаритных конструкций в условиях космоса. В эти годы им был проведен комплекс работ по созданию научно-технологических основ получения в космосе полупроводниковых и композиционных материалов с помощью электронно-лучевой зонной плавки. Сферой его научных интересов являлось также изучение особенностей поведения жидких металлов в условиях микрогравитации и разработка средств активного управления ходом различных технологических процессов, в том числе, методом вибрационных воздействий на жидкие среды.

За большой вклад в развитие космической науки и техники он награжден орденом Трудового Красного Знамени и рядом медалей. В. Ф. Лапчинским опубликовано более 100 печатных работ. Его отличали глубокая эрудиция, высокая культура и нравственность. Особо следует отметить такие человеческие черты характера, присущие ему, как интеллигентность и тактичность. Научное наследие В. Ф. Лапчинского, разработанные им концепции и подходы и в настоящее время не потеряли актуальности.

❖ СБОРНИКИ ❖ МОНОГРАФИИ ❖ ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИЙ



Компьютерные технологии в сварке и промышленности» & Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах (англ. яз.): Сб. докл. Объединенной Шестнадцатой и Третьей междунар. конф. (6–8 июня 2006 г., Киев, ИЭС им. Е. О. Патона) / Под ред. проф. Б. Лукаса и проф. В. И. Махненко. — Киев: ИЭС, 2006. — 328 с., формат 200×290 мм, ISBN 966-95847-8-7, 100 грн./660 руб./50\$.

В сборнике представлены доклады Объединенной Шестнадцатой международной конференции «Компьютерные технологии в сварке и промышленности», проводимой Британским институтом сварки, и Третьей международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», проводимой Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Авторами докладов являются известные специалисты из различных стран мира. Для научных и инженерно-технических работников.



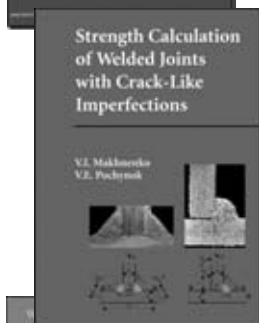
Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Зб. ст. — Київ: ІЕЗ, 2006. — 604 с., формат 200×290 мм, тверда обкладинка, ISBN 966-8872-04-5.

До збірника ввійшли статті, які підготовлені за результатами цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин», отриманими впродовж 2004–2006 рр., до реалізації якої було залучено 22 інститути НАН України. Мета програми — розробка методологічних основ прогнозування залишкового ресурсу конструкцій, створення методів, технічних засобів і технологій для оцінки технічного стану та подовження термінів експлуатації техногенно та екологічно небезпечних об'єктів. Для наукових співробітників, інженерів, студентів старших курсів, зайнятих розробкою та експлуатацією конструкцій, споруд та машин.



Железнодорожный транспорт: Сб. ст. — 2006. — 178 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм. — 60грн./660 руб./38\$.

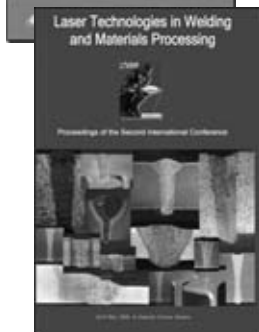
В сборнике представлены статьи и рекламные материалы, опубликованные в журналах «Автоматическая сварка» и «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» за 2001–2005 гг., по проблемам железнодорожного транспорта, посвященные различным аспектам исследований, разработке и применению ряда технологий сварки и наплавки, выбору оборудования и материалов применительно к изготовлению и ремонту конструкций и узлов железнодорожного подвижного состава и путевого хозяйства.



Махненко В. И., Починок В. Е. Расчет напряжений в сварных соединениях с трещиноподобными несовершенствами (англ. яз.). — Киев: ИЭС, 2006. — 266 с., формат 165×235 мм, мягкий переплет, ISBN 966-8072-02-9, 60 грн./660 руб./38\$.



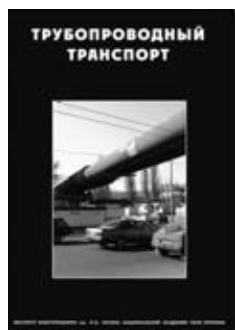
Конonenko В. Я. Технологии подводной мокрой сварки и резки (англ. яз.). — Киев: ИЭС, 2006. — 140 с., формат 140×200 мм, мягкий переплет, ISBN 966-88-72-03-7, 60 грн./660 руб./38\$.



Лазерные технологии в сварке и обработке материалов (англ. яз.): Сб. докл. Второй междунар. конф. (23–27 мая 2005 г., пос. Качивели, Крым) / Под ред. проф. В. С. Коваленко. — Киев: ИЭС, 2005. — 256 с., формат 200×290 мм, ISBN 966-8872-01-0, 100 грн./660 руб./50\$.



КАТАЛОГ. Технологии. Материалы. Оборудование (рус., англ. яз.). — Киев: ИЭС, 2005. — 260 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 100 грн./660 руб./50\$. Каталог содержит информацию о новых, разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, технологиях, материалах и оборудовании для сварки, резки, наплавки, пайки, нанесения защитных покрытий и других родственных процессов, предлагаемых для коммерческой реализации. Может быть полезен широкому кругу инженерно-технических работников, технологов, конструкторов, предпринимателей, занятых в машиностроении, энергетике, строительстве, судостроении, металлургии и других отраслях промышленного производства.



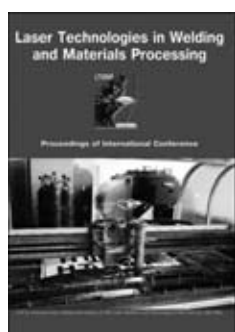
Трубопроводный транспорт: Сб. ст. — Киев: ИЭС, 2005. — 178 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 60 грн./660 руб./38\$.

Представлены статьи, опубликованные в журналах «Автоматическая сварка» и «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» за 2001–2005 гг., по проблемам трубопроводного транспорта, проблемам использования новых сталей в сварных конструкциях, оценке качества трубных сталей и их сварных соединений, разработке оборудования и технологий сварки трубопроводов, вопросам повышения прочности и улучшения структуры и свойств нефте- и газопроводных труб, оценке остаточного ресурса сварных соединений конструкций, сварочным материалам, деформационному старению труб, контролю и диагностике трубопроводов и другим вопросам, касающимся проблемы обеспечения эксплуатационной надежности систем трубопроводного транспорта.



Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Сб. трудов. Второй междунар. конф. (13–17 сент. 2004 г., пос. Кацивели, Крым) / Под ред. проф. В. И. Махненко. — Киев: ИЭС, 2004. — 256 с., формат 200×290 мм, ISBN 966-95847-8-7, 100 грн./660 руб./50\$.

В сборнике представлены доклады Второй международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», в которых отражены достижения за последние годы в области математического моделирования физических явлений, протекающих при сварке, наплавке и других родственных процессах. Авторами докладов являются известные специалисты из различных стран мира. Для научных и инженерно-технических работников, занятых в области сварки, резки, наплавки, пайки, нанесения защитных покрытий и других родственных процессов.

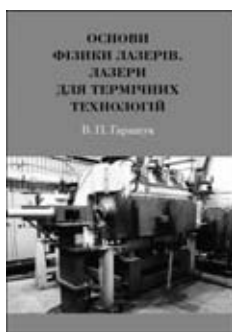


Лазерные технологии в сварке и обработке материалов (англ. яз.): Сб. докл. междунар. конф. (19–23 мая 2003 г., пос. Кацивели, Крым) / Под ред. проф. В. С. Коваленко. — Киев: ИЭС, 2003. — 256 с., формат 200×290 мм, 100 грн./660 руб./50\$.

Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Сб. докл. междунар. конф. (16–20 сент. 2002 г., пос. Кацивели, Крым) / Под ред. проф. В. И. Махненко. — Киев: ИЭС, 2002. — 266 с., формат 200×290 мм, мягкий переплет, ISBN 966-95847-2-8. 100 грн./660 руб./50\$.

В сборнике представлены доклады, в которых отражены достижения за последние годы в области математического моделирования физических явлений, протекающих при сварке, наплавке и других родственных процессах. Рассмотрены также перспективы развития информационных технологий. Одной из характерных особенностей представленных докладов является стремление их авторов получить не только новые научные результаты, но и создать инструмент для практического применения при поиске рациональных технологических решений. В основу таких разработок положено комплексное математическое моделирование связанных друг с другом характерных физических явлений, определяющих качество технологического процесса.





Гарашук В. П. Основы физики лазеров. Лазеры для термических технологий. — Киев: ІЕЗ, 2005. — 244 с., формат 140×200 мм, м'яка обкладинка, ISBN 966-95847-9-5, 60 грн./660 руб./38\$.

У книзі викладено основні вимоги до світлопроменевиx установок для термічних технологій — зварювання, різання тощо. Показано, що найкраще цим вимогам відповідає устаткування з використанням лазера як джерела світла. Розглянуто властивості вимушених переходів в атомах (молекулах) і на їх основі пояснено механізм лазерної генерації електромагнітного випромінювання. Викладено теорію потужності випромінювання, генерованого лазером, з використанням балансних рівнянь заселення і розселення атомних рівнів під час генерації. Розглянуто властивості лазерних пучків, сформованих у стійкому і нестійкому резонаторах, особливості їх фокусування. Порівняно мінімальні перерізи сфокусованих лазерних пучків, сформованих у цих резонаторах; показано, за яких умов доцільно використовувати стійкі чи нестійкі резонатори. Викладено основні поняття про передачу лазерного випромінювання по світловолокну і його фокусування на оброблювану деталь. Подано основні поняття про фізичні процеси у високопотужних лазерах, які використовуються в термічних технологіях — зварюванні, різанні, термообробці, наплавці тощо (CO₂-лазер, рубіновий, неодимовий, напівпровідниковий і ексимерний лазери).



Письменный А. С. Индукционный нагрев для сварки и родственных технологий. — Киев: ІЭС, 2005. — 140 с., формат 140×200 мм, мягкий переплет, ISBN 966-8872-00-2, 60 грн./660 руб./38\$.

В книге изложена теория процессов, происходящих при индукционном нагреве металлов и в системе индуктор–нагреваемое тело, освещены вопросы, возникающие при технической реализации систем этого класса. Получила развитие теория обратных задач электромагнитного поля и индуктора в приложении к проблемам сварки и родственных технологий путем применения импедансных граничных условий, определенных через удельную мощность или температуру на поверхности нагреваемых тел. Это позволяет непосредственно проектировать технологическое оборудование исходя из показателей технологического процесса. Изложены некоторые новые методы построения электрических схем замещения сложных многообмоточных индукционных устройств технологического назначения и расчета их параметров.



ТИТАН: технологии, оборудование, производство (англ., рус. яз.): Сб. ст. — Киев: ІЭС, 2005. — 196 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 100 грн./660 руб./50\$.

В сборнике представлены статьи, опубликованные в журналах «Advances in Electrometallurgy» и «The Paton Welding Journal», за период 2001–2005 гг. по электрометаллургии и сварке титана и его сплавов. Авторами статей являются известные в Украине и за рубежом ученые и специалисты в области титана и его производства. Сборник предназначен для широкого круга читателей, занимающихся проблемами производства, обработки и потребления титана.

По вопросам заказа просьба обращаться

в редакцию журнала «Автоматическая сварка»

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

Информацию о содержании изданий можно найти на сайте www.iaw.com.ua

Цены указаны с НДС соответственно для Украины, России и дальнего зарубежья с учетом доставки заказной бандеролью.

**Разработка, производство, внедрение
Порошковые проволоки
для сварки, наплавки и напыления**

- Производство порошковых проволок ПП-АН, ПП-Нн;
- оборудование для наплавки; Welding Alloys;
- наплавочные установки Welding Alloys;
- порошковые проволоки Welding Alloys;
- проволоки сварочные Hyundai Welding ;
- внедрение новых технологий;
- техническое сопровождение;
- разработка новых проволок;



ООО НПФ "Элна"
ул. Горького, 69, г. Киев, 03680
тел. (044) 200-80-25, 200-85-17
факс (044) 200-85-17
e-mail: info@elna.com.ua

**ЭЛЕКТРОДЫ
ПОРОШКОВЫЕ ПРОВОЛОКИ
ФЛЮСЫ**

Электроды для сварки углеродистых, низколегированных сталей и чугуна (АНО-21, АНО-6у, МР-3, УОНИ-13/55, АНО-4, УОНИ-13/45, АНО-27, АНО-ТМ, АНО-ТМ/СХ, АНО-ТМ/60, ЦУ-5, ЦЧ-4)

Порошковые проволоки для сварки, наплавки, резки (в том числе под водой) ПП-АН1, ПП-АН3, ПП-АН8, ПП-АН29, ПП-АН59, ПП-АН61, ПП-АН63, ПП-АН69, ПП-АН19Н, ПП-АНВ2у, ППС-ЭК1, ПП-ЭК2, ПП-Нп-30Х20Мн, ПП-Нп-12Х14Н13, ПП-Нп-200Х15С1ГРТ, ПП-Нп-30Х12СМТ, ПП-Нп-60Х9С3ГТ, ПП-Нп-200ХГР, ПП-Нп-Х25Г14Н3Т, ПП-Нп-80Г15Н4, ППР-ЭК3, ППР-ЭК4

Флюсы плавленые и керамические, для сварки и наплавки (АН-72, АН-М13, АНК-40, АНК-565, АНК-57, АНК-47А. По отдельным заказам изготавливаем флюсы других марок)

Опытный завод сварочных материалов ИЭС им. Е.О. Патона
04112, г. Киев, ул. Е. Телиги, 2
Тел.: (044) 456 63 69
Факс: (044) 456 50 01



ДОНМЕТ

Завод автогенного оборудования



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

(06264) 5-77-13, 4-26-85

svarka@donmet.com.ua www.donmet.com.ua

Лидер производства порошковых проволок в Украине



ООО "ТМ.ВЕЛТЕК"

Порошковые проволоки для наплавки по ГОСТ 26101-84

-80X20 P3T,35B9X3CФ,25X5ФМС,18X1Г1М и др.

Порошковые проволоки ВЕЛТЕК

-ВЕЛТЕК Н200 - Н620

Порошковые проволоки для сварки

-АН1,АН8,АН39,АНЧ-2 и др.

Порошковые проволоки ТМВ

-ТМВ3,ТМВ6,ТМВ7,ТМВ11,ТМВ14,ТМВ29 и др

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

ул. Полевая, 24, офис 504

03056, Киев, Украина

тел./факс: (38044) 456-0209, 458-3485

e-mail:weldtec@iptelecom.net.ua www.weldtec.com.ua



г. Киев, 03150,
ул. Боженко, 11
www.gefest-sv.com.ua
gefest-sv@kievweb.com.ua

тел./факс: (38044) 200-88-33

Производство высококачественных электродов для:

- Сварки высоколегированных сталей
 - ОЗЛ-6
 - АНЖР-1
 - ЦА-11
 - АНЖР-2
 - ЭА-48М/22
 - ЦТ-15
- Сварки теплоустойчивых сталей
 - ЦУ-5
 - ТМА-1У
 - ЦА-39
 - ТМА-3У
 - ТМУ-21У
- Наплавки слоев со специальными свойствами
 - ЦН-12М
 - Т-590
 - Гефест-6 (ОЗН-6)
 - ЦН-6А
 - НР-70
 - НИИ-48Г
 - ЦЧ-4
 - ЦНИИ-4
- А также множество других марок на заказ

ГОРЕТЬ, ЧТОБЫ СОЗДАВАТЬ!

Вся продукция СЕРТИФИЦИРОВАНА

СпецСплав

www.spetsstplav.dp.ua



- Порошковые проволоки
- Ферросплавы
- Лигатуры
- Хром металлический
- Флюсы сварочные
- Электроды для резки
- Комплексные раскислители
- Электроды наплавочные

ул. Курсантская, 1д,
г.Днепропетровск,
49051, Украина

тел.: (380562) 32-26-22
т/ф: (380562) 32-37-99
sp@spetsstplav.dp.ua

**ПРОИЗВОДСТВО
ПРОДАЖА
СЕРВИСНОЕ
ОБСЛУЖИВАНИЕ**



▶ Малогабаритное, высокоэффективное энергосберегающее сварочное оборудование на токи 110–300 А с ограничением холостого хода до 12 В



▶ Автономные мобильные сварочные комплексы на базе резонансных преобразователей



Сварочные инверторы для ММА и ТIG сварки на токи 80–300А

Украина, 03150, г. Киев, ул. Горького, 94-96, к. 14,
тел./факс: (38044) 271 20 36, 271 21 02
Специализированный магазин: "ИНПАТ-СЕРВИС",
тел.: (044) 220 92 89

"ИЭС - ЭЛС"

НПМГП "ПЛАЗМОТРОН"
Украина, 03057, Киев, ул.Эжена Потье, 9А
тел./факс: 456-23-36, тел.: 456 40 50
E-mail: plasmtec@iptelecom.net.ua,
plasmotron.kiev.ua

**Традиционный разработчик и
производитель оборудования для
воздушно-плазменной резки**

◊ новое поколение универсальных установок "Дуплекс" для ручной резки и сварки металлов толщиной до 20 мм;
◊ установки "Днепр" для машинной и ручной резки металлов толщиной до 65 мм.

Все установки выполнены на инверторных источниках питания и и плазменных резаках с воздушным охлаждением.

Поставляются сменные детали всех видов плазменных резаков.

Предоставляется гарантия на оборудование, а также проводится бесплатное обучение специалистов потребителя.



MEGAFIL®
СТАБИЛЬНОСТЬ ФОРМЫ

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

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


DRAHTZUG STEIN
wire & welding

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

Официальный представитель в Украине
АРКСЭЛ
83017, г. Донецк, пер. Вирский, 2а
Тел.: (062) 332-2650(52)
Тел./факс: 382-9449, 332-2651
E-mail: info@arcsel.dn.ua; www.arcsel.dn.ua



Научно-технические журналы ИЭС им. Е. О. Патона <http://www.nas.gov.ua/pwj>

«Автоматическая сварка», 12 номеров в год, издается с 1948 г. В журнале представлена разнообразная научно-техническая информация по сварке, наплавке, резке, пайке и нанесению защитных покрытий; производственный опыт применения современных технологий для соединения материалов и восстановления изделий; сведения о новых книгах и патентах; обзорная информация о профильных выставках и конференциях; банк производителей товаров и услуг на рынке сварочного производства Украины и России.
Тел.: (38044) 287-63-02, 529-26-23

«Техническая диагностика и неразрушающий контроль», 4 номера в год, издается с 1989 г. В журнале представлены последние достижения в области технической диагностики и неразрушающего контроля (акустическое излучение, магнитные, радиоволновые, термические, оптические, радиационные и другие методы). Широко освещаются методики оценки и прогнозирования разрушений в сварных конструкциях.
Тел.: (38044) 271-23-90, 529-26-23

«Современная электрометаллургия», 4 номера в год, издается с 1985 г. В журнале освещаются разработки в области электрошлаковой, электронно-лучевой и плазменно-дуговой технологий, вакуумно-дугового переплава и индукционной плавки, а также в области внепечной обработки стали, энерго- и ресурсосберегающих металлургических технологий и др. До 2002 г. журнал издавался под названием «Проблемы специальной электрометаллургии».
Тел.: (38044) 528-34-84, 529-26-23

«The Paton Welding Journal», 12 номеров в год. Полный перевод на английский язык журнала «Автоматическая сварка».
Тел.: (38044) 287-63-02, 529-26-23

«Advances in Electrometallurgy», 4 номера в год. Полный перевод на английский язык журнала «Современная электрометаллургия».
Тел.: (38044) 528-34-84, 529-26-23

На официальном сайте журналов www.nas.gov.ua/pwj приведены рефераты опубликованных статей с 2000 г.

Подписка по каталогам подписных агентств, а также через редакцию

Адрес редакций журналов:
03680, г. Киев, ул. Боженко, 11
Тел./факс: (38044) 271-24-03, 529-26-23,
528-04-86
E-mail: journal@paton.kiev.ua



ПОДПИСКА – 2007 на журнал «Автоматическая сварка»

Стоимость подписки через редакцию*	Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
	180 грн.	360 грн.	1980 руб.	3960 руб.	78 дол. США	156 дол. США
*В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.						

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

Телефоны и факсы редакции журнала «Автоматическая сварка»: тел.: (38044) 287-63-02, 271-24-03, 529-26-23, факс: (38044) 528-34-84, 528-04-86, 529-26-23.

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

ПОДПИСНОЙ КУПОН

Адрес для доставки журнала _____

Срок подписки с _____

200 г. по

200 г. включительно

Ф. И. О. _____

Компания _____

Должность _____

Тел., факс, E-mail _____



РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

Обложка наружная, полноцветная

Первая страница обложки (190×190 мм) — 500 \$

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

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

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

Обложка внутренняя, полноцветная

Первая страница обложки (200×290 мм) — 350 \$

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

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

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

Внутренняя вставка

Полноцветная (200×290 мм) — 300 \$

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

Полноцветная (200×145 мм) 150 \$

Черно-белая (170×250 мм) — 80 \$

Черно-белая (170×125 мм) — 50 \$

Черно-белая (80×80 мм) — 15 \$

• Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу.

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

• Статья на правах рекламы — 50% стоимости рекламной площади.

• При заключении рекламных контрактов на сумму, превышающую 1000 \$, предусмотрена гибкая система скидок.

Технические требования к рекламным материалам

• Размер журнала после обрезки 200×290 мм.

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

Все файлы в формате IBM PC

• Corell Draw, версия до 10.0

• Adobe Photoshop, версия до 7.0

• QuarkXPress, версия до 5.0

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

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

Подписано к печати 20.03.2007. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 9,14. Усл. кр.-отт. 9,99. Уч.-изд. л. 10,44 + 2 цв. вклейки.
Цена договорная.
Печать ООО «Фирма «Эссе». 03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.