

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

**Издатель:** Международная ассоциация «Сварка»

**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, В. Ф. Мошкин,  
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)  
Б. Брейтвейт (Великобритания)  
Д. фон Хофе (Германия)  
К. Буше (Франция)  
Гуань Цяо (Китай)  
У. Дилтай (Германия)  
П. Зайффарт (Германия)  
А. С. Зубченко (Россия)  
Т. Игар (США)  
К. Иноуэ (Япония)  
Н. И. Никифоров (Россия)  
Б. Е. Патон (Украина)  
Я. Пилярчик (Польша)  
Чжан Янмин (Китай)  
В. К. Шелег (Беларусь)

*Адрес редакции:*  
03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11  
Институт электросварки  
им. Е. О. Патона НАН Украины  
Тел.: (38044) 287 6302, 529 2623  
Факс: (38044) 528 0486  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj

*Редакторы:*  
Е. Н. Казарова, Т. В. Юштина

*Электронная верстка:*  
И. С. Баташева, А. И. Сулима,  
И. Р. Наумова, И. В. Петушков

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**

**Патон Б. Е., Ющенко К. А., Коваленко Д. В., Кривцун И. В., Демченко В. Ф., Коваленко И. В.** Роль парогазового канала в формировании глубокого проплавления при А-ТИГ сварке нержавеющей стали ..... 3

**Маркашова Л. И., Григоренко Г. М., Лозовская А. В., Кушнарева О. С., Федорчук В. Е.** Влияние добавок скандия на структурно-фазовое состояние металла шва соединений алюминиевых сплавов после термообработки ..... 9

**Гладкий П. В., Павленко А. В., Переплетчиков Е. Ф.** Температура и геометрические размеры сварочной ванны при плазменно-порошковой наплавке ..... 15

**Гиренко В. С., Рабкина М. Д., Гиренко С. В.** Оценка трещиностойкости металла сварных соединений по результатам стандартных механических испытаний с учетом размеров структурных элементов ..... 20

**Скачков И. О., Пирумов А. Е., Максимов С. Ю., Прилипко Е. А.** К вопросу применения нейронных сетей для контроля качества сварных соединений при подводной сварке ..... 27

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ**

**Ченг Ч. Х., Чан Л. Ч., Ли Т. Ч., Чоу Ч. Л.** Оценка деформируемости сварных составных заготовок, полученных лазерной сваркой ..... 32

**Томи С., Зефельд Т.** Особенности применения гибридной лазерно-дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа ..... 36

**Лабур Т. М., Гринюк А. А., Покляцкий А. Г.** Механические свойства сварных соединений алюминий-литиевых сплавов, полученных плазменной сваркой ..... 40

**Кузьменко Г. В., Кузьменко В. Г., Галинич В. И., Отроков В. В., Лактионов М. А.** Однопроходная электродуговая сварка закладным электродом металла большой толщины ..... 44

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

**Чигарев В. В., Кондрашов К. А., Грановский Н. А.** Повышение качества наплавленного металла при плазма-МИГ наплавке алюминиевых сплавов ..... 50

**Пащенко В. Н., Солodкий С. П.** Магнитное управление потоками низкотемпературной плазмы в процессах нанесения газотермических покрытий ..... 53

Новости ..... 56

Патенты в области сварочного производства ..... 57

По зарубежным журналам ..... 59

**ХРОНИКА**

Полезная конференция в области термической обработки металлов ..... 62

Наши поздравления ..... 63

Н. В. Смирнову — 50 лет ..... 63

**ИНФОРМАЦИЯ** ..... 64

Разработано в ИЭС ..... 19, 35, 49

# Avtomaticheskaya Svarka

## (Automatic Welding)

№ 6 (638)

June 2006

Published since 1948

WELDING – CUTTING – SURFACING – BRAZING – COATING

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

**Publisher:** *International Association «Welding»*

### 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, V. F. Moshkin,  
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)  
B. Braithwaite (UK)  
C. Boucher (France)  
D. von Hofe (Germany)  
Guan Qiao (China)  
U. Dilthey (Germany)  
P. Seyffarth (Germany)  
A. S. Zubchenko (Russia)  
T. Eagar (USA)  
K. Inoue (Japan)  
N. I. Nikiforov (Russia)  
B. E. Paton (Ukraine)  
Ya. Pilarczyk (Poland)  
Zhang Yanmin (China)  
V. K. Sheleg (Belarus)

### Address:

The E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the NAS of Ukraine,  
11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine  
Tel.: (38044) 287 63 02, 529 26 23  
Fax: (38044) 528 04 86  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj

### Editors:

E. N. Kazarova, T. V. Yushchina  
*Electron galley:*  
I. S. Batasheva, 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

- Paton B. E., Yushchenko K. A., Kovalenko D. V., Krivtsun I. V., Demchenko V. F., Kovalenko I. V.** Role of a keyhole in the formation of deep penetration in A-TIG welding of stainless steel ..... 3
- Markashova L. I., Grigorenko G. M., Lozovskaya A. V., Kushnareva O. S., Fedorchuk V. E.** Effect of scandium additions on structural-phase state of weld metal of as-heat-treated aluminium alloy joints ..... 9
- Gladky P. V., Pavlenko A. V., Pereplyotchikov E. F.** Temperature and geometric sizes of weld pool in plasma-powder surfacing ..... 15
- Girenko V. S., Rabkina M. D., Girenko S. V.** Assessment of crack resistance of metal of welded joints from the results of standard mechanical tests with account for sizes of structural elements ..... 20
- Skachkov I. O., Pirumov A. E., Maksimov S. Yu., Prilipko E. A.** Towards the problem of application of neural networks for quality control of welded joints in underwater welding ..... 27

### INDUSTRIAL

- Cheng C. H., Chan L. C., Lee T. C., Chow C. L.** Laser welding and formability study of tailor-welded blanks of different thickness combinations and welding orientations ..... 32
- Thomy C., Seefeld T.** Specifics of application of hybrid laser arc consumable electrode welding in shielding gases ..... 36
- Labur T. M., Grinyuk A. A., Poklyatsky A. G.** Mechanical properties of aluminium-lithium alloy welded joints produced by plasma welding ..... 40
- Kuzmenko G. V., Kuzmenko V. G., Galinich V. I., Otkrov V. V., Laktionov M. A.** Electric arc welding of massive metal using an embedded electrode ..... 44

### BRIEF INFORMATION

- Chigarev V. V., Kondrashov K. A., Granovsky N. A.** Improvement of deposited metal quality in plasma-MIG cladding of aluminium alloys ..... 50
- Pashchenko V. N., Solodky S. P.** Magnetic control of low-temperature plasma flows in the processes of deposition of thermal coatings ..... 53
- New ..... 56
- Patents in the field of welding ..... 57
- Review of foreign journals ..... 59

### NEWS

- Useful conference in the field of heat treatment of metals ..... 62
- Our congratulations ..... 63
- N. V. Smirnov is 50 ..... 63

### INFORMATION

- Developed at the PWI ..... 19, 35, 49

*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.*



## РОЛЬ ПАРОГАЗОВОГО КАНАЛА В ФОРМИРОВАНИИ ГЛУБОКОГО ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ А-ТИГ СВАРКЕ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Академик **Б. Е. ПАТОН**, академик НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО**, **Д. В. КОВАЛЕНКО**, инж.,  
чл.-кор. НАН Украины **И. В. КРИВЦУН**, **В. Ф. ДЕМЧЕНКО**, д-р техн. наук, **И. В. КОВАЛЕНКО**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены результаты экспериментальных исследований геометрических размеров и формы поверхности сварочной ванны при ТИГ и А-ТИГ сварке поверхностной дугой при неполном проплавлении нержавеющей стали типа 12Х18Н10Т (304Н). Высказано предположение о том, что одной из причин глубокого проплавления при А-ТИГ сварке является формирование парогазового канала и связанное с этим изменение интенсивности конвекции Марангони. Характерные для А-ТИГ сварки формы свободной поверхности и дна сварочной ванны подтверждают существование предложенного механизма глубокого проплавления.

*Ключевые слова:* ТИГ и А-ТИГ сварка, дуга, сварочная ванна, проплавление, парогазовый канал, конвекция Марангони, нержавеющая сталь

А-ТИГ сварка (ТИГ сварка по слою активирующего флюса) является достаточно простой и эффективной альтернативой ТИГ сварке, а также плазменной, лазерной и электронно-лучевой сварке. При сварке поверхностной дугой глубина проплавления повышается более чем в 3 раза по сравнению с ТИГ сваркой. Способ А-ТИГ сварки позволяет сваривать различные металлы за один проход без разделки кромок и использования присадочной проволоки, в частности, выполнять стыковые соединения при односторонней сварке сталей малой и средней толщины (от 1 до 12 мм), двусторонней сварке сталей толщиной от 6 до 25 мм, а также корневые швы в разделку с увеличенным притуплением кромок (4...6 мм). Кроме того, А-ТИГ сварка дает возможность получать швы одинакового размера и качества при сварке сталей одной марки, но различной выплавки, а также обеспечивать более низкие значения деформации и усадки сварных соединений [1–4].

В настоящее время существуют различные гипотезы о причинах и механизмах более глубокого проплавления при А-ТИГ сварке по сравнению с ТИГ процессом. Предлагаемые гипотезы можно объединить в две основные группы:

изменение характера и структуры гидродинамических потоков в сварочной ванне в зависимости от направления течения Марангони [5, 6], а также повышения роли пондеромоторных (лоренцевых) сил при формировании течения расплавленного металла [7, 8];

контрагирование дуги за счет электроотрицательных элементов и изоляционного действия ак-

тивирующего флюса, и обусловленные этим повышение плотности тока и соответственно концентрации теплового воздействия дуги на поверхности сварочной ванны [2, 9–11].

Проведенные нами ранее [12] исследования ТИГ и А-ТИГ сварки нержавеющей стали 304Н (при использовании аэрозольного оксидного активатора ПАТИГ С-А) показали, что с увеличением тока дуги происходит перераспределение влияния механизмов глубокого проплавления (первая и вторая гипотезы) на проплавляющую способность А-ТИГ сварки. В частности, контрагирование дуги оказывается наиболее значительным фактором при сварке на низких (до 100 А) токах. С повышением тока от 100 до 150 А влияние контрагирования дуги на глубину проплавления и формирование шва ослабляется более чем в 2 раза в общем балансе механизмов, обуславливающих глубокое проплавление при А-ТИГ сварке.

Обычно исследования процесса проплавления свариваемого металла проводятся на основе анализа размеров сварных швов (глубины проплавления, ширины и коэффициента формы шва). Вместе с тем, в литературе, освещающей вопросы А-ТИГ сварки, не уделяется достаточного внимания деформации свободной поверхности жидкого металла, которая, на наш взгляд, может оказывать существенное влияние на формирование сварного шва.

В настоящей работе на основе анализа экспериментальных данных о геометрии поверхности сварочной ванны при ТИГ и А-ТИГ сварке нержавеющей стали 304Н с неполным проплавлением выдвигается гипотеза об образовании квазипарогазового канала при А-ТИГ сварке поверхностной дугой и его роли в интенсификации конвективного

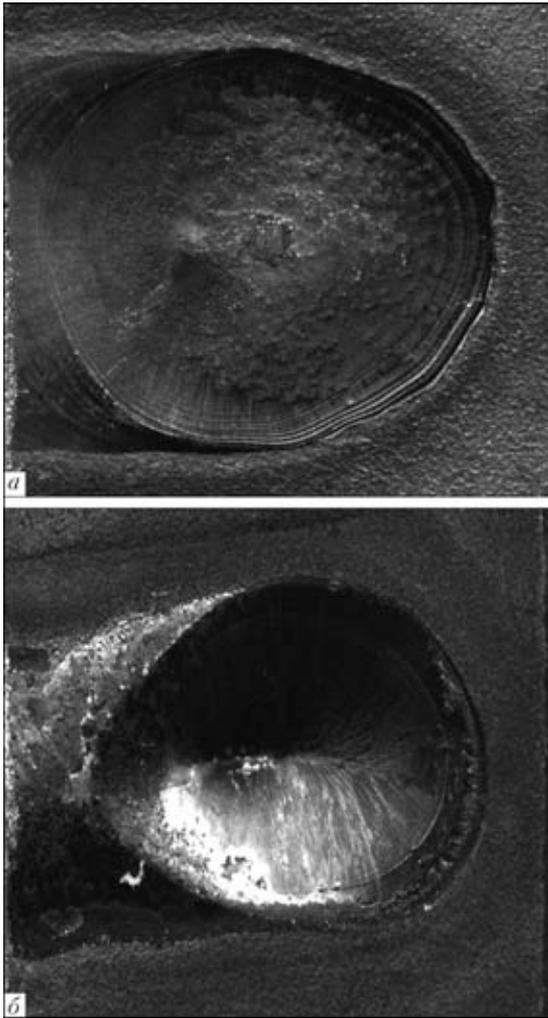


Рис. 1. Внешний вид (сверху) поверхности застывших сварочных ванн при ТИГ (*a*) и А-ТИГ сварке (*б*) при  $I_{св} = 200$  А

переноса тепла в расплавленном металле, обеспечивающего глубокое проплавление.

**Результаты экспериментальных исследований.** Сварочные эксперименты выполняли на пластинах размером  $150 \times 50 \times 9$  мм из нержавеющей стали 304Н (0,006 % S, 0,006 % O). Перед А-ТИГ сваркой на поверхность пластины наносили равномерный контролируемый слой активатора (-оксида) шириной 5 мм и толщиной 20 мкм. Толщину слоя активатора контролировали специальным толщиномером ТП-34 на основе вихретокового преобразователя. В качестве активаторов использовали в отдельности следующие оксидные соединения:  $Al_2O_3$ , MgO, CaO, SrO,  $Cr_2O_3$ , MnO, CoO,  $Fe_2O_3$ ,  $Ga_2O_3$ ,  $In_2O_3$ ,  $GeO_2$ ,  $SnO_2$ ,  $V_2O_5$ ,  $MoO_3$ ,  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ .

Эксперименты проводили на сварочной установке ОБ-2279 для ТИГ сварки с тиристорным источником питания ВСВУ-315.

При проведении экспериментов использовали следующий режим сварки: ток сварки — 100, 150 и 200 А; длина дуги — 1,5 мм (установочное расстояние от конца вольфрамового электрода до поверхности пластины перед сваркой); скорость

сварки — 100 мм/мин; защитный газ — аргон; применяли вольфрамовый электрод (2 % Th) диаметром 3,2 мм, угол заточки составлял  $30^\circ$ , притупление — 0,5 мм.

Исходя из сложности контроля очертаний и измерения размеров поверхности жидкой ванны непосредственно в процессе сварки использовали следующую методику. Во время сварки осуществляли мгновенный обрыв дуги путем выключения источника питания и остановку перемещения образца относительно вольфрамового электрода. Форму затвердевшей поверхности металла в первом приближении можно рассматривать как очертания свободной поверхности жидкой сварочной ванны. Анализ этой формы и измерение геометрических размеров ее поверхности проводили на макрошлифах образца, вырезанных как поперек шва в зоне центра кратера, так и в продольном сечении шва.

Внешний вид поверхности затвердевших сварочных ванн ТИГ и А-ТИГ при сварке представлен на рис. 1, *a*. Соответствующие макрошлифы, вырезанные из поперечного и продольного сечения швов, на рис. 2. Для анализа профилей дна и свободной поверхности сварочной ванны в продольном сечении шва будем использовать общую схему расположения электрода относительно ванны и ее характерные геометрические размеры при ТИГ и А-ТИГ сварке (рис. 3). Значения представленных на этом рисунке геометрических параметров для различных режимов сварки приведены в таблице.

При сравнении очертаний поверхностей продольных и поперечных размеров сварочных ванн при ТИГ и А-ТИГ сварке выявилось их значительное отличие (см. рис. 1, 2 и таблицу), что свидетельствует, по-видимому, о различных механизмах проплавления при указанных способах сварки. В частности, анализ размеров и формы наружной поверхности затвердевших ванн при ТИГ и А-ТИГ сварке показал следующее. Передняя и хвостовая часть поверхности сварочной ванны при А-ТИГ сварке имеют выпуклую форму с четко выраженным характерным углублением (лункой) вблизи центра кратера (см. рис. 1, *б* и 2, *б*, *з*), что особенно заметно в поперечном сечении шва (рис. 2, *б*). Такого существенного углубления при ТИГ сварке не наблюдается (рис. 1, *a* и 2, *a*, *в*). С повышением тока дуги глубина этой лунки увеличивается при использовании всех исследованных оксидов. Вместе с тем, при одном и том же значении тока эта глубина отличается в случае использования различных оксидов. По степени увеличения глубины кратера  $H_{кр}$  с одновременным повышением глубины проплавления  $H_{пр}$  оксиды можно расположить в следующем порядке: отличающиеся более низкой ( $Al_2O_3$ , MgO, CaO, SrO,  $Cr_2O_3$ , MnO, CoO,  $Fe_2O_3$ ) и более высокой ( $Ga_2O_3$ ,

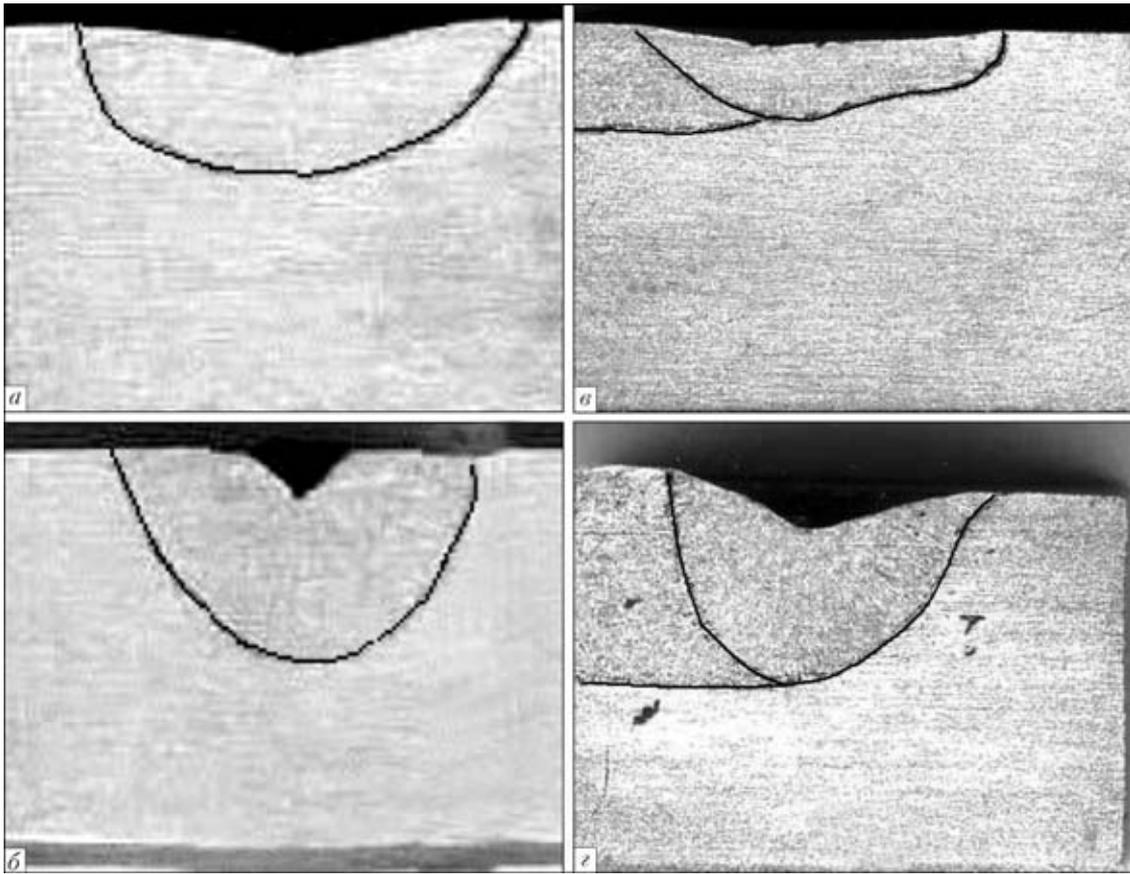


Рис. 2. Поперечное (а, б) и продольное (в, з) сечения застывших сварочных ванн при ТИГ (а, в) и А-ТИГ сварке (б, з) ( $I_{св} = 150$  А)

$In_2O_3$ ,  $GeO_2$ ,  $SnO_2$ ,  $V_2O_5$ ,  $MoO_3$ ,  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ ) степень проплавления. Изменение  $H_{кр}$  и  $H_{пр}$  при использовании трех характерных оксидов ( $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ) приведены на рис. 4.

Анализ продольных шлифов швов, выполненных ТИГ и А-ТИГ сваркой, показал следующее. Как при ТИГ, так и при А-ТИГ сварке положения точек максимального прогиба (лунки кратера) по-

верхности сварочной ванны  $L_{H_{кр}}$  и максимальной глубины проплавления  $L_{H_{пр}}$  смещены по отношению к оси вольфрамового электрода в сторону хвостовой части ванны. В случае А-ТИГ сварки это смещение увеличивается при повышении тока сварки, а также изменяется в зависимости от типа используемого оксида. Однако при всех прочих равных условиях оно меньше, чем в случае ТИГ сварки. На рис. 5 схематически представлены результаты анализа при  $I_{св} = 200$  А.

**Обсуждение результатов экспериментальных исследований.** Проанализируем приведенные выше результаты экспериментальных исследований с точки зрения возможного механизма глубокого проплавления при А-ТИГ сварке. Из двух факторов, обуславливающих деформацию свободной поверхности сварочной ванны — газодинамического давления столба дуги и давления отдачи паров — рассмотрим сначала первый. Как известно, движение плазмы столба дуги происходит под воздействием ротационной составляющей силы Лоренца, которая в условиях осевой симметрии электромагнитного поля в столбе дуги является центростремительной (направлена к оси столба дуги). При ТИГ сварке эпюра распределения магнитного давления по высоте столба имеет максимум вблизи катода, где плотность тока максимальна. Вследствие этого в столбе дуги

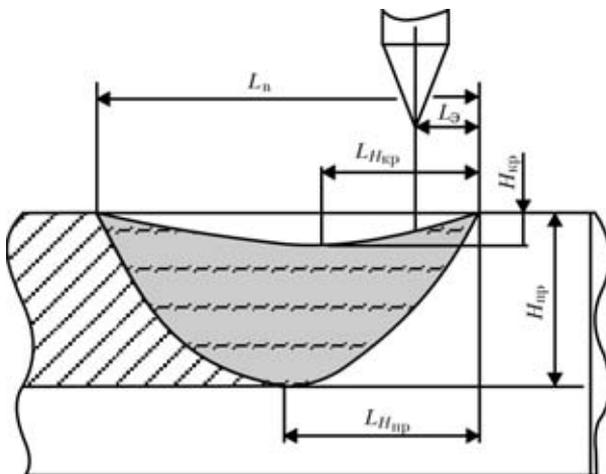


Рис. 3. Схема измерения характерных размеров сварочной ванны при ТИГ и А-ТИГ сварке:  $L_n$  — длина ванны;  $L_э$  — расстояние от переднего края ванны к оси электрода;  $L_{H_{кр}}$ ,  $L_{H_{пр}}$  — расстояние от переднего края ванны до точки максимальной глубины соответственно кратера и проплавления;  $H_{кр}$ ,  $H_{пр}$  — глубина соответственно кратера и проплавления



**Режимы сварки и геометрические размеры сварочных ванн при ТИГ и А-ТИГ сварке стали 304Н толщиной 9 мм**

Способ сварки (оксид)	$I_{св}$ , А	$L_b$ , мм	$H_{кр}$ , мм	$L_3$ , мм	$L_{H_{кр}}$ , мм	$L_{H_{пр}}$ , мм	$H_{пр}$ , мм
ТИГ	100	5,5	0,20	2,5	3,2	3,9	1,0
А-ТИГ (TiO <sub>2</sub> )	100	4,5	0,50	1,6	2,1	3,0	2,2
ТИГ	150	8,2	0,35	3,0	5,5	6,7	2,5
А-ТИГ (TiO <sub>2</sub> )	150	7,5	1,20	2,0	4,6	5,5	5,7
ТИГ	200	11,5	0,50	3,6	9,5	10,0	3,1
А-ТИГ (TiO <sub>2</sub> )	200	9,0	1,50	2,5	8,0	7,7	6,2

формируется поток плазмы в аксиальном направлении (от катода к аноду), который при взаимодействии с поверхностью сварочной ванны растекается, образуя характерную колоколообразную форму дуги. Возникающее в прианодной области газодинамическое давление в определенной мере способствует деформации свободной поверхности сварочной ванны. Иначе обстоит в случае А-ТИГ сварки. Принято считать, что при сварке по слою активирующего флюса происходит контрагирование дуги, которое проявляется в уменьшении площади анодного пятна до размеров, сопоставимых с площадью катодной области. При этом распределение плотности тока по высоте столба дуги имеет два максимума, расположенных вблизи катода и анода. Аналогичный характер имеет также распределение ротационной составляющей силы Лоренца, в связи с чем возникают два встречных потока плазмы, направленных от катода и анода к средней (по высоте) части столба. В результате их взаимодействия наблюдается бочкообразная форма факела с максимумом давления в месте столкновения потоков плазмы. Таким образом, газодинамическое давление столба дуги как фактор деформации свободной поверхности сварочной ванны при А-ТИГ сварке следует исключить. Отметим, что о явлении контрагирования дуги при А-ТИГ сварке можно говорить лишь с определенной сте-

пенью условности, понимая под этим термином прежде всего уменьшение площади анодного пятна.

При анализе влияния эффекта контрагирования дуги на глубину проплавления рассмотрим два характерных случая. При А-ТИГ сварке на низких (до 100 А) токах формируется ванна небольшого поперечного сечения. Образующаяся при этом сила поверхностного натяжения, пропорциональная радиусу кривизны поверхности, превалирует над давлением реакции отдачи паров, вследствие чего деформация свободной поверхности сварочной ванны затруднена. Поэтому основным фактором, определяющим проплавление основного металла при сварке на малых токах, является перенос тепла из перегретой области, находящейся вблизи анодного пятна, в глубь металла в соответствии с механизмом теплопроводности и конвекцией, развивающейся в поле массовых сил (силы Лоренца и Архимеда).

При повышенных (от 100 до 200 А) токах эффект контрагирования дуги и связанное с ним локальное повышение температуры поверхности сварочной ванны в пределах анодного пятна не могут обеспечить такого существенного увеличения глубины, которое наблюдается при А-ТИГ сварке. По нашему мнению, для увеличения глубины проплавления в этом случае требуется не только перегреть приповерхностный слой металла, но и обеспечить условия для деформации свободной поверхности расплава с тем, чтобы приблизить источник тепла ко дну ванны (по аналогии со сваркой высококонцентрированными источниками энергии — лазерной и электронно-лучевой [13, 14]). В случае небольшой площади свободной поверхности сварочной ванны подобная деформация затруднена из-за высокого уровня сил поверхностного натяжения. Такие условия реализуются при интенсивном испарении металла с поверхности сварочной ванны за счет реакции отдачи струи расширяющегося пара и снижения коэффициента поверхностного натяжения расплава в перегретой области. Благодаря контрагиро-

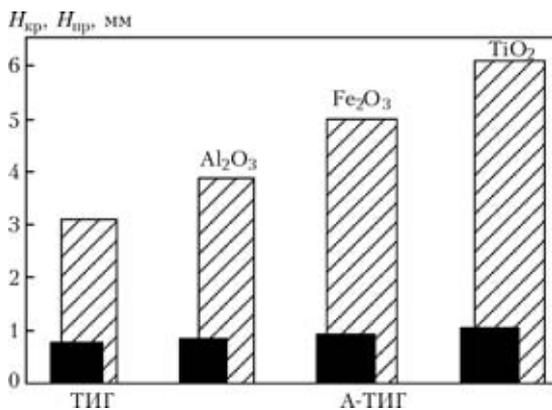


Рис. 4. Влияние ТИГ и А-ТИГ процесса сварки с использованием различных оксидов на глубину кратера  $H_{кр}$  (черная область) и проплавления  $H_{пр}$  (заштрихованная) сварочных ванн при  $I_{св} = 200$  А

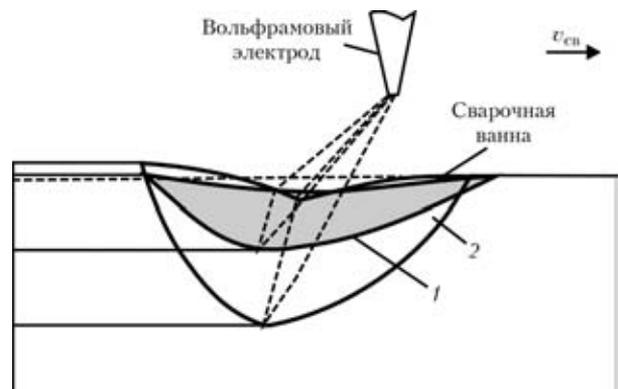


Рис. 5. Схема продольных сечений застывших сварочных ванн при ТИГ (1) и А-ТИГ сварке (2) ( $I_{св} = 200$  А)



ванию дуги при А-ТИГ сварке вполне вероятно, что соответствующее увеличение плотности теплового потока на аноде способно обеспечить локальный перегрев и испарение расплавленного металла и привести к существенному искривлению поверхности сварочной ванны и образованию квазипарогазового канала [15].

С помощью экспериментальных исследований установлено [16], что вследствие контрагирования дуги при А-ТИГ сварке на сварочном токе 200 А плотность теплового потока составляет  $1 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> и выше. Известно, что для интенсивного испарения металла его поверхность необходимо нагреть источником, имеющим плотность теплового потока в пятне нагрева порядка  $1 \cdot 10^5 \dots 1 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> [14]. Хотя плотность теплового потока в анодном пятне при А-ТИГ сварке остается ниже той, которая достигается при лучевых способах сварки (мощность дуги распределяется на свободной поверхности сварочной ванны в пятне гораздо больших размеров, чем типичное фокусное пятно), однако, с нашей точки зрения, она может оказаться достаточной для того, чтобы обеспечить перегрев поверхности расплава до температуры, близкой к температуре кипения, и выше. Вследствие этого металл сварочной ванны интенсивно испаряется, а ее свободная поверхность под воздействием реакции отдачи паров деформируется, образуя кратер и парогазовый канал [16], в котором происходят процессы разлета и конденсации пара, аналогичные тем, которые протекают в узких и глубоких парогазовых каналах при электронно-лучевой и лазерной сварке, хотя они и выражены не так ярко. В этом отношении А-ТИГ сварка на повышенных токах занимает промежуточное положение между дуговыми и лучевыми способами сварки.

Данные о проплавляющей способности ТИГ и А-ТИГ сварки, приведенные на рис. 4, свидетельствуют о том, что приращение глубины проплавления при А-ТИГ сварке существенно больше максимального прогиба свободной поверхности. Поэтому в силу местного влияния глубокое проплавление при А-ТИГ сварке не может объясняться только как результат заглупления источника тепла (анодного пятна) и приближения его ко дну сварочной ванны. Вероятнее всего, существует и другой механизм, обеспечивающий такое проплавление.

Для дальнейшего исследования механизма глубокого проплавления при А-ТИГ сварке обратимся к конвекции Марангони, которая возникает под воздействием поверхностной капиллярной силы, образующейся вследствие градиента коэффициента поверхностного натяжения вдоль поверхности сварочной ванны. В отличие от ТИГ сварки, при которой действие капиллярной силы направлено в сторону, противоположную градиенту темпера-

туры — от центра к периферии ванны, при А-ТИГ сварке в результате активации свободной поверхности расплава капиллярная сила действует в противоположном направлении [5, 6]. Под ее действием в приповерхностном слое сварочной ванны возникает течение расплава, которое при сварке А-ТИГ направлено к тепловому центру свободной поверхности ванны (к центру анодного пятна). Если свободная поверхность сварочной ванны незначительно искривлена, то потоки расплава, движущиеся к центру ванны навстречу друг другу, при столкновении теряют импульс, вследствие чего нисходящий поток расплава становится слабоинтенсивным (рис. 6, а), а образующееся вихревое течение, локализованное в верхней части сварочной ванны, оказывает в ограниченной степени влияние на глубину проплавления. Гидродинамическая обстановка в сварочной ванне существенно изменяется, если в результате реакции отдачи паров на поверхности ванны образовался парогазовый канал. В этом случае движущиеся вдоль наклонной поверхности канала потоки расплава встречаются под углом  $\alpha \approx 45^\circ$  (а, возможно, и больше). В результате гидродинамического взаимодействия этих потоков их импульсы суммируются, образуя интенсивное нисходящее струйное течение (рис. 6, б), которое способно эффективно транспортировать перегретый металл ко дну ванны, обеспечивая тем самым существенное повышение глубины проплавления. Таким образом, парогазовый канал можно рассматривать как геометрический фактор активации течения Марангони, интенсифицирующий нисходящий поток перегретого расплава ко дну сварочной ванны. Вблизи дна ванны этот поток разворачивается в сторону боковых стенок сварочной ванны. Имеющая

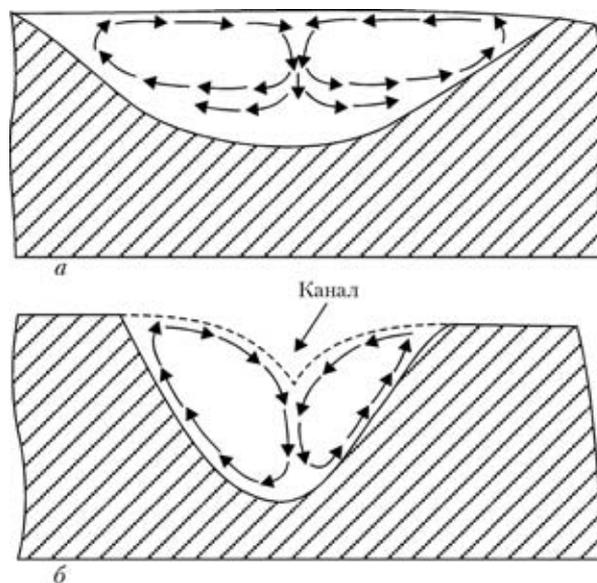


Рис. 6. Схематическое изображение конвекции Марангони в случае плоской (а) и искривленной (б) поверхности сварочной ванны



место в отдельных экспериментах бочкообразная форма поперечного сечения шва, по всей вероятности, связана с тем, что возвратный поток расплава сохраняет температуру, достаточную для подплавления боковых кромок.

Предложенный механизм глубокого проплавления при А-ТИГ сварке требует дальнейших исследований, направленных на прецизионное определение плотности тока в анодном пятне и формы свободной поверхности сварочной ванны, фиксацию реальных очертаний квазипарогазового канала в процессе сварки. Несомненный интерес представляет также математическое моделирование 3D процессов тепломассопереноса и гидродинамики сварочной ванны с учетом взаимодействия массовых и капиллярных сил, деформации свободной поверхности, испарения и конденсации вещества, а также особенностей горения дуги в условиях А-ТИГ сварки. Модель такой структуры позволит дать количественную оценку роли парогазового канала и конвекции Марангони в формировании глубокого проплавления при А-ТИГ сварке.

#### Выводы

1. При А-ТИГ сварке на свободной поверхности сварочной ванны образуется характерный кратер с углублением (лункой), расположенным вблизи центра поверхности ванны. С повышением тока дуги это углубление становится более узким и вытянутым в продольном сечении шва, что обычно наблюдается при сварке высококонцентрированными источниками нагрева с образованием парогазового канала, а также увеличивается глубина кратера и проплавления при использовании всех исследованных оксидов.

2. Установлено, что, как при ТИГ, так и А-ТИГ сварке, положение точек максимального прогиба поверхности сварочной ванны и максимальной глубины проплавления смещены по отношению к оси вольфрамового электрода в сторону хвостовой части ванны. В случае А-ТИГ сварки это смещение при всех прочих равных условиях меньше, чем при ТИГ сварке.

3. Высказано мнение, что гидродинамическое взаимодействие потоков расплава, вызванных градиентом поверхностного натяжения, в условиях деформированной свободной поверхности сварочной ванны (А-ТИГ сварка на больших токах) при-

водит к образованию интенсивного нисходящего течения, которое транспортирует перегретый металл из анодного пятна ко дну сварочной ванны, обеспечивая тем самым существенное увеличение глубины проплавления.

1. Ющенко К. А., Коваленко Д. В., Коваленко И. В. Применение активаторов при дуговой сварке вольфрамовым электродом в инертных газах (А-ТИГ) сталей и сплавов // Автомат. сварка. — 2001. — № 7. — С. 37–43.
2. Савицкий М. М., Кушниренко В. Н., Олейник О. И. Особенности сварки сталей вольфрамовым электродом с активными флюсами (А-ТИГ-процесс) // Там же. — 1999. — № 12. — С. 20–26.
3. Lucas W., Howse D. Activating flux — increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes // Weld. and Metal Fabr. — 1996. — № 1. — P. 11–15.
4. Lucas W. Activating flux — improving the performance of the TIG process // Ibid. — 2000. — № 2. — P. 7–10.
5. Surface active element effects on the shape of GTA, laser and electron beam welds / C. R. Heiple, J. R. Roper, R. T. Stagner, R. J. Aden // Welding J. — 1983. — 62, № 3. — P. 72–77.
6. Effects of activating flux on arc phenomena in GTAW / M. Tanaka, T. Shimizu, H. Terasaki et al. // Sci. and Techn. of Weld. and Joining. — 2000. — 5, № 6. — P. 397–402.
7. Влияние активирующих флюсов на проплавляющую способность сварочной дуги и концентрацию энергии в анодном пятне / О. Е. Островский, В. Н. Крюковский, Б. Б. Бук и др. // Свароч. пр-во. — 1977. — № 3. — С. 3–4.
8. Замков В. Н., Прилуцкий В. П. Теория и практика ТIG-F сварки (А-ТИГ) (Обзор) // Автомат. сварка. — 2004. — № 9. — С. 12–15.
9. Патон Б. Е., Замков В. Н., Прилуцкий В. П. Контракция дуги флюсом при сварке вольфрамовым электродом // Там же. — 2000. — № 1. — С. 1–8.
10. A-TIG — increasing the performance and productivity of the TIG process / W. Lucas, D. Howse, M. M. Savitsky, I. V. Kovalenko. — S. 1., [1996]. — 17 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-1448–96).
11. Lowke J., Tanaka M., Ushio M. Insulation effects of flux layer in producing greater weld depth. — S. 1., [2004]. — 7 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. 212-1053–04).
12. Yushchenko K. A., Kovalenko D. V., Kovalenko I. V. Comparative analysis of TIG and A-TIG welding of stainless steel. — S. 1., [2005]. — 9 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. 212-1088–05).
13. Лесков Г. И., Трунов Е. Н., Живага Л. И. Форма, размеры и устойчивость пародинамических каналов в металле при электроннолучевой сварке // Автомат. сварка. — 1976. — № 6. — С. 13–17.
14. Воздействие лазерного излучения на материалы / Р. В. Арутюнян, В. Ю. Баранов, Л. А. Большов и др. — М.: Наука, 1989. — 367 с.
15. Formation of quasi keyhole is a cause of deep penetration in A-TIG welding of stainless steel / K. A. Yushchenko, D. V. Kovalenko, I. V. Krivtsov et al. — S. 1., [2005]. — 17 p. (Intern. Inst. of Welding; Doc. 212-1085–05).
16. Yushchenko K. A., Kovalenko D. V., Kovalenko I. V. Investigation of peculiarities of A-TIG welding of stainless steels. — S. 1., [2003]. — 18 p. (Intern. Inst. of Welding; Doc. 212-1047–03).

Given are the results of experimental studies of dimensions and shape of the weld pool surface in TIG and A-TIG welding of stainless steel 304N using the surface arc with incomplete penetration. It is hypothesized that one of the causes of deep penetration in A-TIG welding is formation of a keyhole and associated change in the Marangoni convection intensity. Configurations of the free surface and bottom of the weld pool, characteristic of A-TIG welding, prove this mechanism of deep penetration.

Поступила в редакцию 04.11.2005,  
в окончательном варианте 17.04.2006



УДК 621.791:669.71

## ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК СКАНДИЯ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛА ШВА СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ТЕРМООБРАБОТКИ

Л. И. МАРКАШОВА, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН Украины Г. М. ГРИГОРЕНКО, А. В. ЛОЗОВСКАЯ, канд. техн. наук, О. С. КУШНАРЕВА, В. Е. ФЕДОРЧУК, инженеры  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрено влияние термообработки (старение при 350 °С, 1 ч) на изменение структурно-фазового состояния металла швов, полученных при аргонодуговой сварке сплава 1460 с использованием присадок Св1201 и Св1201 + 0,5 % Sc. Показано, что термообработка способствует существенному увеличению объемной доли дисперсных фаз, отличающихся по морфологии и фазовому составу. В металле без скандия формируются Al-Cu-фазы, отличающиеся различной концентрацией меди, а Al-Li-фазы имеют более сложное строение за счет включений дисперсных фаз Al-Zr- и Al-Cu-фаз. В металле со скандием формируются сложные композитные фазовые выделения пластинчатого (Al-Cu/Al<sub>3</sub>Sc) и глобулярного (Al-Li/Al-Zr, Al-Sc) типов.

*Ключевые слова:* сварные соединения, алюминиевый сплав, термообработка, скандий, структурно-фазовые преобразования, плотность дислокаций, композитные фазовые выделения

Алюминиево-литиевые сплавы, относящиеся к стареющим сплавам, как правило, отличаются сложным структурно-фазовым состоянием, что во многом обусловлено специфическими особенностями структурных и фазовых превращений, происходящих в процессе технологического цикла получения этих материалов и последующей термической обработки.

Известна особая роль фазовых составляющих металлов вообще [1, 2] и алюминиевых сплавов, в частности, в изменении различных механических и служебных характеристик — прочности, пластичности, трещиностойкости, вязкости разрушения, сопротивления циклическим нагрузкам и т. п. [3, 4]. В ряде работ эффект упрочнения алюминиево-литиевых сплавов связывают, например, с измельчением зеренной структуры [5], чему способствуют фазовые выделения типа Al-Sc. В других работах [6, 7] отмечается, что при легировании алюминиевых сплавов скандием достигается упрочнение за счет измельчения не только зерна, но и непосредственно частиц α'-фазы (Al<sub>3</sub>Sc), формирующихся в процессе старения. Исходя из этого для достижения оптимального упрочнения предлагается ограничить температурный интервал режимов старения (300...350 °С) и уменьшить время выдержки от 6 до 1 ч.

Исследования влияния температурных режимов нагрева указанных стареющих алюминиево-литиевых сплавов на изменение фазового состава показали, что в температурном интервале 450...500 °С первичные частицы Al<sub>3</sub>Sc не раст-

воряются [8]. Однако наряду с характерными признаками первичных Al<sub>3</sub>Sc-фаз зафиксированы слабые сверхструктурные отражения, которые могут свидетельствовать о присутствии δ'-фазы (Al<sub>3</sub>Li), хотя фактически наличие фаз такого типа обнаружить не удалось [9, 10], что, возможно, связано с их дисперсностью и малой плотностью распределения в металле.

Существует также мнение о том, что особенностью сплавов системы Al-Li-Sc является образование фазовых выделений композитного типа, имеющих вид двухслойных частиц, состоящих из ядра α'-фазы (Al<sub>3</sub>Sc) и оболочки из δ'-фазы (Al<sub>3</sub>Li), которая формируется при гетерогенном зарождении последней на межфазной границе Al<sub>3</sub>Sc-фазы. Как свидетельствует приведенный краткий анализ имеющихся литературных данных, указанные сплавы характеризуются многообразием фазовых выделений, претерпевающих в зависимости от температурных условий обработки сложные изменения, а наличие таких фазовых выделений во многом определяет свойства этих сплавов.

Что касается сварных соединений алюминиево-литиевых сплавов, то, как следует из [11], сложность технологического процесса, включающего условия сварки (в результате которого материал приобретает неравновесное состояние) и последующую термическую обработку, не позволяет однозначно трактовать характер фазовых переходов в металле шва и зоне термического влияния соединений.

Результаты исследований фазовых превращений в металле шва непосредственно после сварки изложены в работах [12, 13], где также приведены



данные об изменении структурно-фазового состава в сплавах в зависимости от наличия скандия.

Целью настоящей работы является исследование структурно-фазовых изменений металла шва, обусловленных последующей (после сварки) термической обработкой — старением.

Материалом для исследования служили швы (термообработка при температуре 350 °С в течение 1 ч), полученные при сварке сплава 1460 (Al–3 % Cu–2 % Li–0,08 % Sc) с присадками Св1201 (Al–6,5 % Cu–0,25 % Zr–0,3 % Mn) и Св1201 + 0,5 % Sc.

Исследования проводили с использованием методов просвечивающей электронной микроскопии на установке JEM-200СХ при ускоряющем напряжении 200 кВ. Такой метод исследования выбран как единственно возможный, позволяющий выявить реально формирующиеся структуры (субзеренную, дислокационную) и фазовые выделения на различных стадиях их образования.

Образцы для исследований вырезали из центральной части швов с использованием операции электроэрозионной резки, последовательного механического и электролитического утонения изготовленных шайб с последующим многократным

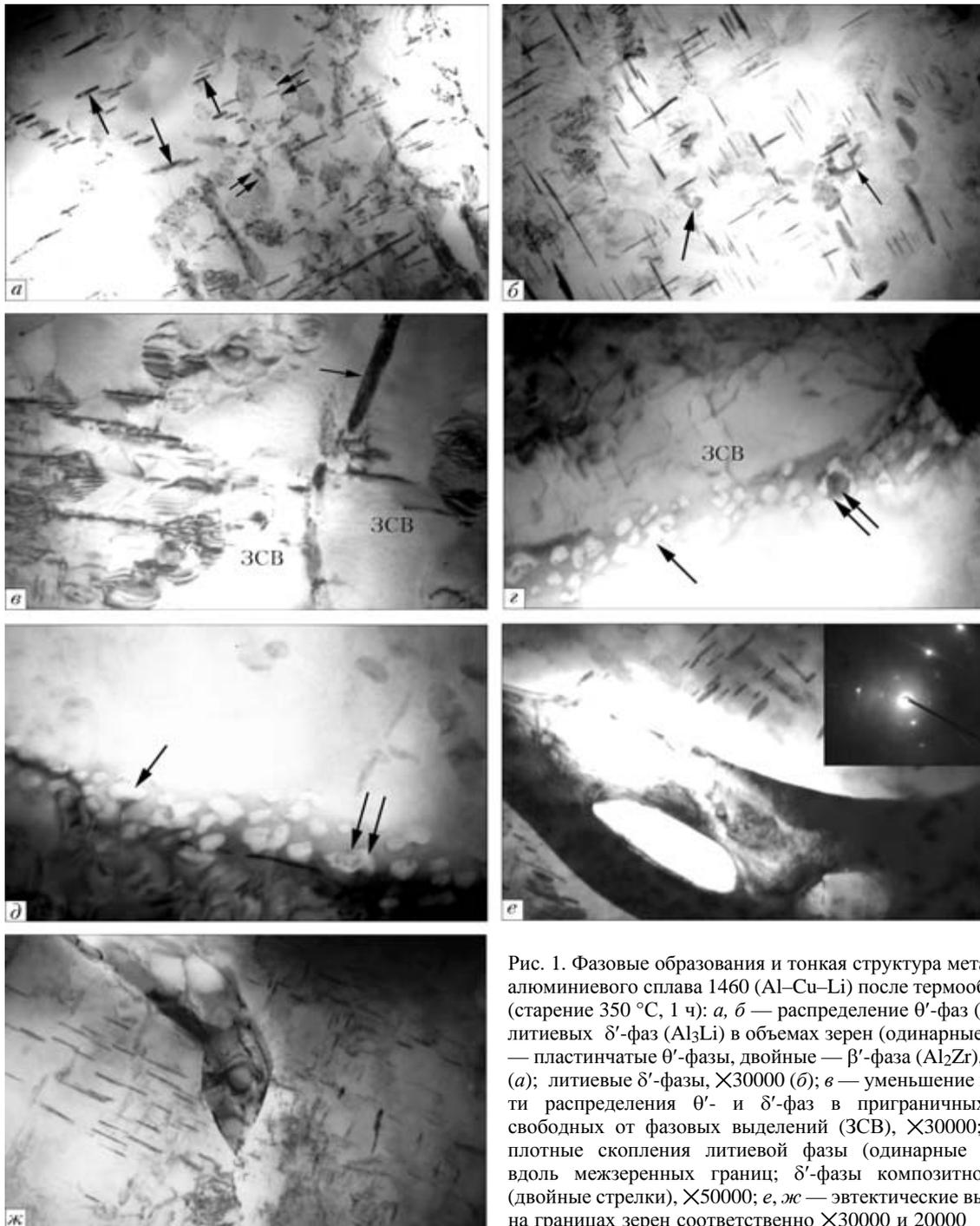


Рис. 1. Фазовые образования и тонкая структура металла шва алюминиевого сплава 1460 (Al–Cu–Li) после термообработки (старение 350 °С, 1 ч): *а, б* — распределение  $\theta'$ -фаз ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) и литевых  $\delta'$ -фаз ( $\text{Al}_3\text{Li}$ ) в объемах зерен (одинарные стрелки — пластинчатые  $\theta'$ -фазы, двойные —  $\beta'$ -фаза ( $\text{Al}_2\text{Zr}$ ),  $\times 20000$  (*а*); литевые  $\delta'$ -фазы,  $\times 30000$  (*б*); *в* — уменьшение плотности распределения  $\theta'$ - и  $\delta'$ -фаз в приграничных зонах, свободных от фазовых выделений (ЗСВ),  $\times 30000$ ; *г, д* — плотные скопления литевой фазы (одинарные стрелки) вдоль межзеренных границ;  $\delta'$ -фазы композитного типа (двойные стрелки),  $\times 50000$ ; *е, ж* — эвтектические выделения на границах зерен соответственно  $\times 30000$  и  $20000$



ионным утонением в установке [14] ионизированными потоками аргона.

Исследованы тонкая структура и распределение фазовых образований во внутренних объемах зерен и вдоль межзеренных границ, характер выделений эвтектического типа и другие особенности структурно-фазового состояния металла швов с различным химическим составом — со скандием и без скандия.

Внутризеренная структура металла, полученного с применением присадки Св1201 (без скандия), характеризуется общей невысокой плотностью дислокаций  $\rho = 6 \cdot 10^8 \dots 2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ , при этом имеет место неравномерное распределение дефектов кристаллической решетки. Некоторое локальное повышение плотности дислокаций обнаружено в зонах формирования фазовых выделений (рис. 1, а–в).

В характере формирования внутризеренных фазовых образований можно отметить следующее. Во внутренних объемах зерен зафиксировано образование фазовых выделений, отличающихся по размеру (довольно крупные выделения преимущественно глобулярной формы диаметром  $d_{\text{ф.в}} \sim 1,5 \dots 2,0 \text{ мкм}$ ). Образования указанного типа, как правило, представляют собой сложный конгломерат, состоящий в основном из  $\theta'$ -фаз ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) с включениями  $\beta'$ -фаз ( $\text{Al}_3\text{Zr}$ ). Фазовые выделения другого типа имеют более значительную дисперсность и более разнообразную морфологию: стержневую (пластинчатую) длиной  $l \sim 0,1 \dots 0,5 \text{ мкм}$  и толщиной  $h \approx 0,01 \dots 0,03 \text{ мкм}$ , а также глобулярную форму  $d_{\text{ф.в}} \approx 0,10 \dots 0,15 \text{ мкм}$  (рис. 1, а–в). Выделения пластинчатого типа представляют собой  $\theta'$ -фазу ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ). Рост фазовых образований этого типа происходит за счет слияния растущих мелкодисперсных пластин  $\theta'$ -фаз (рис. 1, б, в). Следует отметить, что выделения  $\theta'$ -фаз происходят либо на дисперсных частицах  $\beta'$ -фаз ( $\text{Al}_3\text{Zr}$ ) (рис. 1, а), либо  $\delta'$ -фаз ( $\text{Al}_3\text{Li}$ ) (рис. 1, б). Последнее свидетельствует о том, что частицы композитного типа имеют не только глобулярную, но и неправильную геометрическую форму.

Структура межзеренных границ и зернограничных прослоек заметно изменяется по сравнению с формирующейся непосредственно после сварки (рис. 1, г, д). Толщина прослоек такого типа после термообработки ( $350 \text{ }^\circ\text{C}$ , 1 ч) составляет  $h \approx 0,25 \dots 0,35 \text{ мкм}$ . Зафиксированы также отличия в зернограничных выделениях (ЗГВ) по фазовому составу. Так, в некоторых случаях в ЗГВ четко просматриваются явно обособленные фазовые образования с литием, имеющие различную морфологию, — преимущественно глобулярную и удлиненную форму размером  $(0,05 \dots 0,15) \times (0,40 \dots 0,50) \text{ мкм}$  и диаметром  $0,05 \dots 0,10 \text{ мкм}$ . В других случаях ЗГВ представляют собой плотные, сравнительно однородные по контрасту удлиненного типа пла-

стины, состав которых соответствует  $\theta'$ -фазам ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) (рис. 1, в — отмечены стрелкой).

Обнаружены ЗГВ и более сложного состава, имеющие вид композита, состоящего из образований, которые отличаются по контрасту, а следовательно, и по плотности фаз (рис. 1, г, д). Образование этого типа характеризуются довольно крупными размерами и состоят преимущественно из алюминиево-литиевых и алюминиево-медных фаз типа  $\text{AlLi}$  и  $\text{Al}_2\text{Cu}$  ( $0,5 \times 1,0 \text{ мкм}$ ). Реже фиксируются ЗГВ с более дисперсными ( $0,05 \times 0,10 \text{ мкм}$ ) включениями в них  $\text{Al}_3\text{Zr}$ -фаз.

Особо следует отметить наличие приграничных ЗСВ с  $h = 0,44 \dots 0,60 \text{ мкм}$ , в которых после термообработки значительно снижена плотность дислокаций (рис. 1, г, д).

Характерный вид эвтектических образований в металле шва в термообработанном состоянии показан на рис. 1, е, ж. Как видно из рисунка, эвтектика состоит из обособленных фаз и их конгломератов.

Для структуры термообработанного металла шва, содержащего 0,25 % Sc, характерно следующее. Выявлено весьма значительное количество фазовых образований во внутренних объемах зерен и по их границам, существенно отличающихся по сравнению с металлом без скандия размерами, внутренней структурой и морфологией.

Если объемная доля включений крупных фаз ( $d \sim 1,5 \dots 2,0 \text{ мкм}$ ), имеющих композитную структуру, в том и другом случае практически одинакова, то содержание фазовых выделений средних ( $d_{\text{ф.в}} \sim 0,2 \dots 0,5 \text{ мкм}$ ) и более дисперсных (сотые доли микрометра) размеров в металле со скандием заметно возрастает (рис. 2, а–в). Причем фазовые образования заполняют (или существенно сужают) примыкающую к межзеренным границам ЗСВ (рис. 2, г, д).

Исследования состава фазовых образований показали, что фазы стержневой или пластинчатой формы (различие в форме, по-видимому, связано с расположением фаз относительно плоскости исследуемой фольги) представляют собой образования  $\theta'$ -фаз ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ), что подтверждается их микродифракционными отражениями при исследовании тонких фольг на просвет. При этом обнаруживается сложное (композитное) строение  $\theta'$ -фаз. Наряду с характерными для фаз  $\text{Al}_2\text{Cu}$  пластинами серого контраста зафиксированы и слои темного контраста (рис. 2, б–д). Микродифракционный анализ в сочетании со съемкой в темнопольном изображении отдельных составляющих фаз выявил наряду с наличием  $\text{Al}_2\text{Cu}$ -фаз присутствие  $\alpha'$ -фаз ( $\text{Al}_3\text{Sc}$ ). Фазы, содержащие скандий, обнаружены также в композитных выделениях, расположенных непосредственно вдоль межзеренных границ (рис. 2, д, ж). Кроме того,

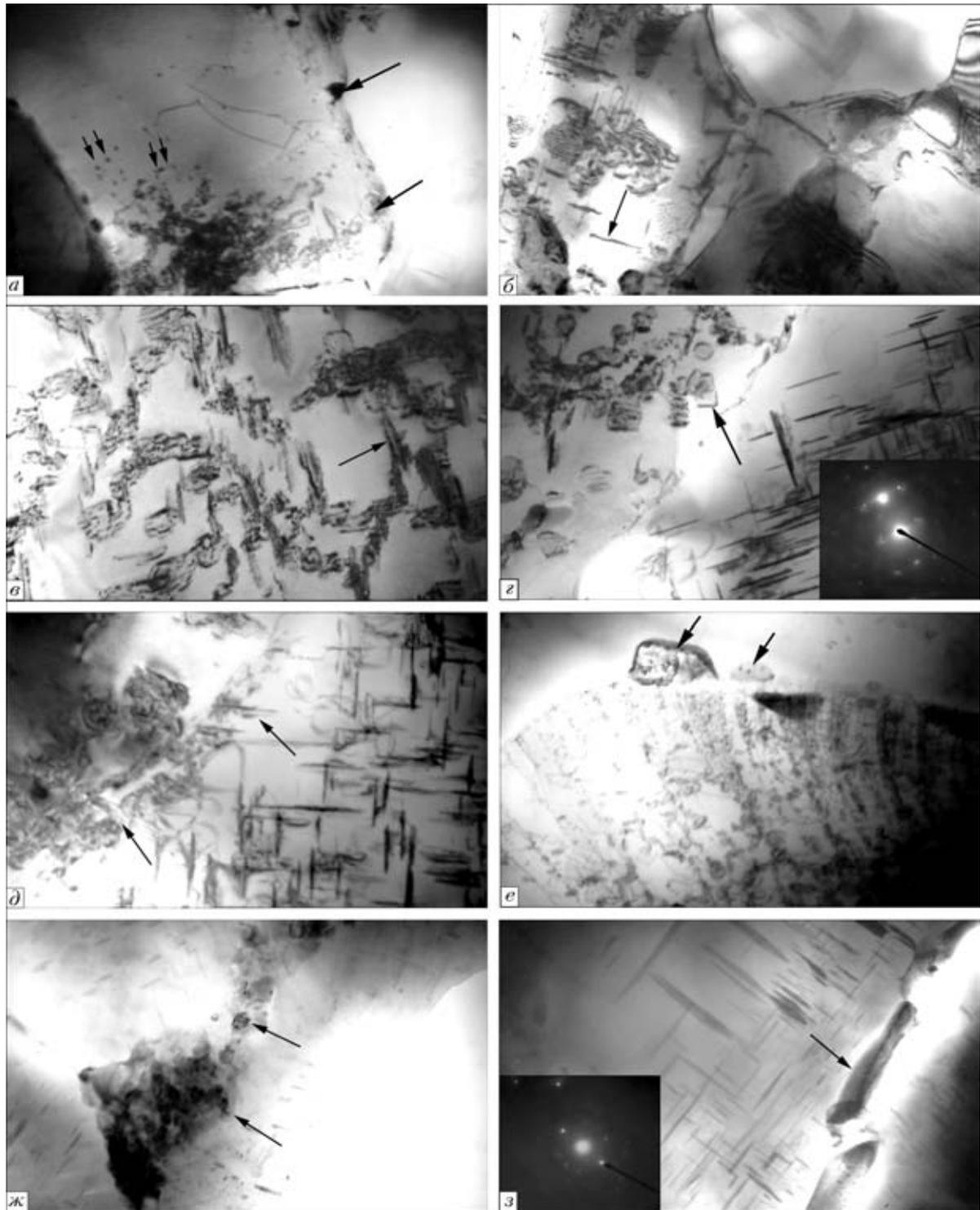


Рис. 2. Микроструктура металла сварного соединения алюминиевого сплава 1460 (Al-Cu-Li) с добавками 0,25...0,30 % Sc после термообработки (старение 350 °С, 1 ч): а — распределение дисперсных скандиевых фаз (одинарные стрелки) вдоль границ и субграниц, двойные стрелки —  $\beta'$ -фаза ( $\text{Al}_3\text{Zr}$ )  $\times 15000$ ; б, в — распределение композитных  $\theta'$ -фаз ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) (стрелки) и образование ячеистой структуры в объемах зерен,  $\times 20000$ ; г, д — распределение скандиевой и литиевой композитных фаз (стрелки) в зоне межзеренных границ,  $\times 30000$ ; е — крупные композитные фазы на основе  $\text{Al}_3\text{Sc}$  на границах зерен,  $\times 30000$ ; ж, з — соответственно рыхлые ( $\times 30000$ ) и плотные ( $\times 20000$ ) композитного типа зернограницные эвтектики

среди ультрадисперсных композитного типа фаз выявлены фазы и других составов, например, фазы, содержащие литий, которые имеют вид дисков и квадратов размерами не более 0,1 мкм (рис. 2, г), а также содержащие цирконий  $\beta'$ -фазы ( $\text{Al}_3\text{Zr}$ )  $d \sim 0,04$  мкм и менее (рис. 2, а, д).

Как правило, содержащие цирконий фазы обнаруживают в центре фаз другого состава, что, по-видимому, связано с температурным интервалом образования фаз, формирующих композит.

В данном случае, вероятнее всего, такими центрами зарождения станут фазы типа  $\text{Al}_3\text{Zr}$  и  $\text{Al}_3\text{Sc}$ ,



поскольку они имеют наиболее высокую температуру образования [1]. Особо следует отметить, что фазы с цирконием являются наиболее мелкодисперсными из характерных для исследуемого материала и выделяются в объеме металла сравнительно равномерно. Это может создавать предпосылки для последующего равномерного выделения и роста других фаз.

Зернограничные эвтектики в отличие от состояния эвтектических зон в металле шва непосредственно после сварки при последующей термообработке в значительной степени «рассыпаются» и разлагаются на отдельные обособленные фазовые составляющие (рис. 2, ж, з), что приводит к существенному измельчению отдельных фазовых выделений в эвтектике. Кроме того, ряд дисперсных фазовых выделений в эвтектике теряют четкие очертания, вокруг фаз формируется сегрегационный контраст. Этот факт свидетельствует об активно протекающих процессах диффузионного растворения. Наиболее устойчивыми из них являются, по-видимому, фазы, содержащие литий.

Следует отметить также особенности дислокационной структуры металла шва при использовании присадок со скандием. В процессе термообработки в металле шва существенно повышается плотность дислокаций, что, по-видимому, обусловлено значительным нарушением когерентности решетки матрицы и выделяющейся фазы, изменением вида напряженного состояния в месте сопряжения матрица–фаза. Уровень напряжений в области распада (о чем свидетельствует высокая локальная плотность дислокаций) значительно превосходит уровень упругих напряжений, характерный для когерентных связей. Очевидно, присутствие скандия «активизирует» металл в процессе распада твердого раствора при термообработке.

Высокая плотность дислокаций, свидетельствующая о весьма неравновесном состоянии металла в ходе распада твердого раствора, способствует также протеканию последующих процессов перераспределения образующихся дефектов кристаллической решетки, что проявляется в формировании блоков, ячеек, субзерен, т. е. в измельчении суб- и зеренной структуры.

Кроме того, активное перераспределение дефектов кристаллической решетки, как правило, сопровождается перераспределением химических элементов и даже дисперсных фаз, что в свою очередь стимулирует процессы фазовых образований в металле. Причем фазовые образования определенных размеров могут «закреплять» суб- и межзеренные границы, что также способствует измельчению структуры.

Судя по характеру формирующихся дислокационных конфигураций различного типа, размытию фазового контраста в области расположения

фазовых выделений, можно заключить, что в зоне межзеренных границ происходят активные изменения дислокационной структуры самих границ, а также состава и распределения фазовых выделений вдоль этих границ. Фазы, содержащие литий, а именно, δ'-фаза (Al<sub>3</sub>Li), сохраняются на границах, однако их меньше по сравнению с металлом без скандия (см. рис. 2).

## Выводы

1. В результате термообработки размеры и состав крупных фазовых выделений практически не изменяются по сравнению с таковыми после сварки в металле со скандием и без него. Такие фазовые выделения представляют собой сложный конгломерат на основе алюминиево-медной фазы.

2. Зафиксированы отдельные двойные фазы типа Al–Sc различных размеров — крупные, располагающиеся по границам зерен, и более дисперсные, формирующиеся внутри зерен и в приграничных зонах, обычно свободных от выделений. Тем самым нивелируется негативное влияние ЗСВ.

3. Установлено, что термообработка способствует существенному повышению плотности распределения фаз: дисперсных ( $d \sim 0,10 \dots 0,15$  мкм) и ультрадисперсных ( $d \sim 0,05 \dots 0,10$  мкм) размеров, отличающихся по морфологии (фазы пластинчатого типа на основе Al<sub>2</sub>Cu и глобулярного — на основе AlLi).

4. Показано, что фазовый состав формирующихся выделений во многом определяется наличием или отсутствием скандия: в металле без присадки скандия фазы пластинчатого типа (Al–Cu) преобразуются в сложные структуры, отличающиеся различной концентрацией меди; фазы глобулярного типа (Al–Li) усложняются за счет включений дисперсных фаз (Al–Zr и Al–Cu); в металле со скандием формируются сложные композитные фазовые выделения пластинчатого (Al–Cu/Al<sub>3</sub>Sc), а также глобулярного (Al–Li/Al–Zr, Al–Sc) типов.

1. Гилман Д. Дж. Физика прочности и пластичности / Пер. с англ.; под. ред. Л. К. Гордиенко. — М.: Металлургия, 1972. — 290 с.
2. Аргон Али С. Физика прочности и пластичности / Пер. с англ.; под. ред. Л. К. Гордиенко. — М.: Металлургия, 1972. — 304 с.
3. Production of ultrafine-grained metallic materials using an intense plastic straining technique / M. Furukawa, P. Berbon, Z. Horita et al. // Materials Science Forum. — 1997. — 233/234. — P. 177–184.
4. Mechanical properties of submicron grained Al–Li alloys / N. K. Tsenev, R. Z. Valiev, O. V. Obraztsov, I. N. Fridlyander // Proc. of 6th Intern. aluminium conf., Germany, Oct. 8–10, 1992. — P. 1125–1135.
5. Pat. 3 619 181 US, CP. 75-138. Willey aluminium-scandium alloy / A. Lowel. — Publ. 09.12.71.
6. Furukawa M., Miura Y., Nemoto M. Temperature and strain rate dependences of yield stress of an Al–Cu–Li–Mg–Zr alloy // Transaction Jap. Inst. Metals. — 1987. — № 28. — P. 655–665.



7. *Fraction and phase spacing of fibrous intermetallic S–Li–Al in hypoeutectic Al–Li alloys by unidirectional solidification* / M. Gufnghui, Yu. Huasyun, P. Delin, An. Gtying // *Металлофизика. Новейшие технологии.* — 2000. — **22**, № 4. — С. 58–61.
8. *Волков В. А.* Влияние легирующих элементов на процессы распада сплавов Al–Li и Al–Sc: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Киев, 1987. — 21 с.
9. *Некоторые особенности распада пересыщенного твердого раствора сплавов системы Al–Sc* / Ф. Л. Березина, В. А. Волков, Б. П. Домашникова, К. В. Чуистов // *Металлофизика.* — 1987. — **9**, № 5. — С. 43–45.
10. *Gayle F. W., Vander Sande J. B.* Composite precipitates in an Al–Li–Zr alloy // *Scripta Metallic Mater.* — 1984. — № 18. — P. 473–478.
11. *Сэйити А., Митинори О.* Свариваемость высокопрочных алюминиевых сплавов при ЭЛС // *Сварка легких металлов (Япония).* — 1992. — **30**, № 1. — С. 12–18.
12. Влияние добавок скандия на структурно-фазовое состояние металла шва при сварке алюминиевых сплавов 1460 / Л. И. Маркашова, Г. М. Григоренко, А. Я. Ищенко и др. // *Автомат. сварка.* — 2006. — № 1. — С. 17–24.
13. Влияние добавок скандия на тонкую структуру металла шва соединений алюминиевого сплава 1460 / Л. И. Маркашова, Г. М. Григоренко, А. Я. Ищенко и др. // *Там же.* — № 2. — С. 22–28.
14. *Метод* препарирования для электронно-микроскопических исследований / Ю. Ф. Даровский, Л. И. Маркашова, Н. П. Абрамов и др. // *Там же.* — 1985. — № 12. — С. 60.

The influence of heat treatment (ageing at 350 °C, 1 h) on the change of the structural-phase composition of weld metal of 1460 alloy joints, produced in argon-arc welding with Sv1201 and 1201 + 0,5 % Sc filler wires is considered. It is shown that heat treatment promotes an essential increase in volume fraction of dispersed phases, differing in their morphology and phase composition. In the metal without scandium, Al–Cu phases featuring different copper concentration are formed, while Al–Li phases have a more complex structure due to inclusions of dispersed Al–Zr and Al–Cu phases. Scandium-containing metal forms complex phase precipitates of plate-like Al–Cu/Al<sub>3</sub>Sc and globular Al–Li/Al–Zr, Al–Sc.

Поступила в редакцию 31.01.2005

## **Восстановление работоспособности вертикальных стальных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов с гарантированным сроком службы не менее 20-ти лет**

*Институт электросварки им. Е. О. Патона выполняет комплексную диагностику резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов, а также разрабатывает технические решения для восстановления их работоспособности при гарантированном послеремонтном сроке службы не менее 20 лет.*

*Анализ результатов обследования показывает, что после пятнадцати лет эксплуатации толщины II–XII поясов стенки в основном отвечают требованиям норм России и Украины: ПБ 03-605-03 и ВБН В.2.2-58.2-94. Это дает основание полагать, что работоспособность стенки — главного конструктивного элемента резервуара — будет обеспечена еще не менее 20 лет. Замена подлежит часть или весь первый пояс стенки вместе с окрайками днища. Из-за отсутствия антикоррозионной защиты днище в большинстве случаев необходимо менять на новое. Учитывая возросшие экологические требования, целесообразно рассматривать с заказчиком и вопрос увеличения толщины центральной части днища до 8...10 мм или применения двойного днища.*



*Замена днища, первого пояса и вертикальных монтажных стыков стенки, при условии обеспечения проектного уровня налива и гарантированного безремонтного срока службы резервуаров не менее 20 лет, требуют разработки новых технологий ремонта и специальных проектов КМ и ППР. Причем в данном случае технология ремонта является ведущим звеном и определяет конструктивные решения для разработки проекта КМ.*

*В ИЭС им. Е. О. Патона разработаны новые технологии по выполнению капитального ремонта стальных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов вместимостью 5, 10, 20 и 50 тыс.м<sup>3</sup>, которые позволяют восстанавливать их работоспособность при проектном уровне налива продукта с учетом требований действующих норм и гарантированным сроком службы не менее 20 лет. Разработанные технологии по замене монтажных соединений стенки рулонированных резервуаров, подъему резервуаров на высоту до 2,0 м, замене днища и центральной части плавающей крыши полноразмерными полосами успешно применяются на объектах нефтегазового комплекса стран СНГ.*

**Наш контактный тел./факс:  
г. Москва (495) 926-0905, 926-0347;  
г. Киев (38044) 287-6679,  
электронный адрес: reservoir @ paton.kiev.ua**



## ТЕМПЕРАТУРА И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ ПРИ ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКЕ

**П. В. ГЛАДКИЙ**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**А. В. ПАВЛЕНКО**, д-р-инж. (Делоро Стеллит ГмбХ, Германия),  
**Е. Ф. ПЕРЕПЛЕТЧИКОВ**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты экспериментального исследования температуры, массы, размеров сварочной ванны и наплавленного слоя при плазменно-порошковой и аргонодуговой наплавке плавящимся электродом.

*Ключевые слова:* плазменная наплавка, присадочный порошок, сварочная ванна, температура ванны, форма и размеры ванны, плазменно-порошковая наплавка, аргонодуговая наплавка

Знание теплового состояния, формы и размеров ванны жидкого металла при дуговой и плазменной наплавке позволяют управлять формированием слоев заданных размеров, а также структурой и свойствами наплавленного металла.

Вопросам изучения теплового состояния и геометрических размеров ванны жидкого металла при различных способах сварки и наплавки посвящено много публикаций [1–7], однако сведений, характеризующих стадию ванны при плазменной наплавке с подачей в дугу присадочного порошка, недостаточно. В то же время этот процесс выгодно отличается от большинства других процессов наплавки (сварки) возможностью независимой подачи в ванну присадочного порошка, теплосодержание и количество которого можно регулировать в широких пределах [8].

В настоящей работе для исследования размеров и средней температуры ванны при плазменно-порошковой наплавке используется методика принудительного выплескивания металла ванны в калориметр в процессе наплавки и модернизированное устройство [9, 10] для ее реализации (рис. 1). При выполнении эксперимента платформу 5 с образцом 3 предварительно устанавливают в рабочее (горизонтальное) положение. Наплавку производят от середины к краю образца. После наплавки валика определенной длины платформа с образцом освобождается от защелки 8, закрепленной на раме 1, и под действием пружины 7 с большой скоростью поворачивается вокруг оси и ударяется о неподвижный упор 6. Во время поворота платформы и частично при ударе жидкий металл ванны под действием сил инерции выплескивается и попадает в калориметр 2. Дуга обрывается при повороте платформы, плазматрон 4 остается неподвижным. Время переноса металла

ванны с пластины в калориметр составляет 0,08...0,13 с.

Измерительная система установки, методика определения теплосодержания и средней температуры металла ванны, попавшего в калориметр, аналогичны использованным при калориметрировании присадочного порошка в работе [8]. Размеры сварочной ванны оценивали по кратеру, получаемому при выплескивании жидкого металла. При этом не весь металл попадает в калориметр, часть остается на поверхности образца в виде напыля. С учетом теплосодержания напыля средняя температура сварочной ванны

$$T_B = \frac{m_K T_K + m_H T_H}{m_K + m_H}, \quad (1)$$

где  $m_H$ ,  $T_H$ ,  $m_K$ ,  $T_K$  — соответственно масса и температура напыля и металла, попавшего в калориметр.

Температуру напыля определяли для каждого эксперимента расчетным путем на основании следующих предположений. Если напыль на стенах кратера очень мал, то его температура близка к температуре плавления. С другой стороны, если

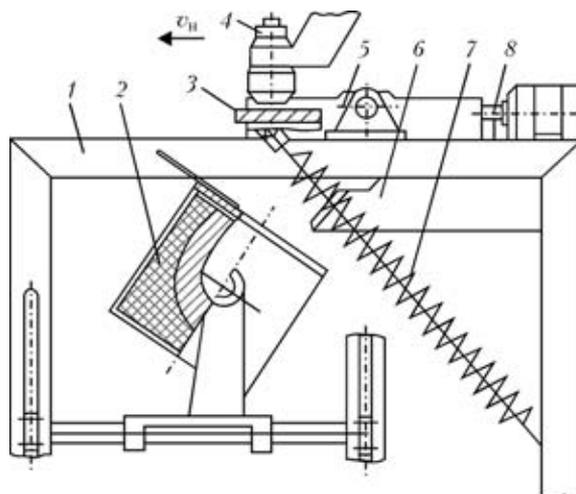


Рис. 1. Схема установки для исследования размеров и средней температуры сварочной ванны (обозначение см. в тексте)



бы весь металл сварочной ванны остался на образце (в наплыве), то температура наплыва была бы равна температуре ванны. Зависимость температуры наплыва от его массы принята линейной:

$$\frac{T_H}{T_{пл}} = \left( \frac{T_B}{T_{пл}} - 1 \right) \frac{m_H}{m_B} + 1, \quad (2)$$

где  $m_B$  — масса сварочной ванны, которая приближенно определяется как

$$m_B = m_K + m_H. \quad (3)$$

При расчете погрешности измерения энтальпии и средней температуры ванны учтены потери тепла в результате конвекции и радиации при переносе металла ванны в калориметр; переход тепла из ванны в основной металл при повороте платформы с образцом; тепло, аккумулированное в слое металла ванны, оставшемся на стенках кратера; количество тепла, неизмеренное калориметром из-за нагрева последнего в ходе эксперимента. Потери тепла в результате конвекции и радиации, которые оценивали по методике [9], составили соответственно 2,1 и 1,7 Дж/г. Количество тепла, передаваемого жидкой ванной основному металлу за время поворота платформы с образцом, рассчитанное по уравнению теплопроводности Фурье, равно 5,7 Дж/г. Учет тепла, аккумулированного в слое невыпеснутого металла ванны,

понижает значение удельного теплосодержания металла ванны на 4 Дж/г. Количество тепла, неизмеренное калориметром из-за повышения температуры последнего в процессе эксперимента, составило в среднем 0,2 Дж/г. Погрешность определения средней температуры ванны составила  $\pm 24$  К, массы ванны  $\pm 0,4$  г.

Исследовали влияние тока дуги  $I$ , расхода порошка при плазменной наплавке  $G_p$ , расхода электродной проволоки при аргонодуговой наплавке  $G_s$ , грануляции порошка  $d_p$ , скорости наплавки  $v_H$ , размаха  $A$  и частоты колебаний  $f$  плазмотрона на среднюю температуру металла ванны  $T_B$ , массу  $m_B$  и длину  $L$  ванны, ширину наплавленного валика  $B$ , глубину  $h$  и площадь проплавления  $F_0$ , высоту наплавленного валика  $H$ , площадь зеркала ванны в плане  $F_3$ .

С целью исключения влияния перемешивания основного и присадочного материалов при наплавке на свойства жидкого металла ванны использовали основной металл и присадочный порошок близких химических составов, соответствующих марке стали 10X18H10T.

Анализ результатов измерений показывает, что размеры, масса и средняя температура ванны при плазменной наплавке с присадкой порошка существенно меньше, чем при аргонодуговой наплавке плавящимся электродом (рис. 2–4). Поскольку сравнение проведено на сопоставимых режимах (по мощности дуги и производительности подачи присадочного материала), имеющееся различие в значительной мере связано с тепловым состоянием присадочного материала, попадающего в сварочную ванну.

При плазменной наплавке с возрастанием тока (а значит и эффективной тепловой мощности дуги) сварочная ванна, ее теплосодержание и средняя температура увеличиваются.

С возрастанием скорости перемещения плазмотрона, что эквивалентно уменьшению погонной энергии, средняя температура ванны повышается,

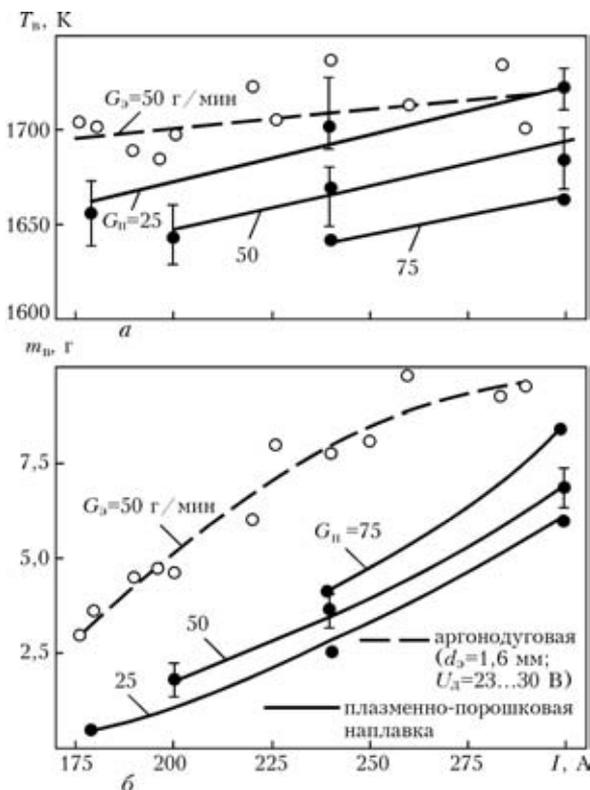


Рис. 2. Средняя температура (а) и масса (б) ванны при плазменно-порошковой и аргонодуговой наплавке плавящимся электродом

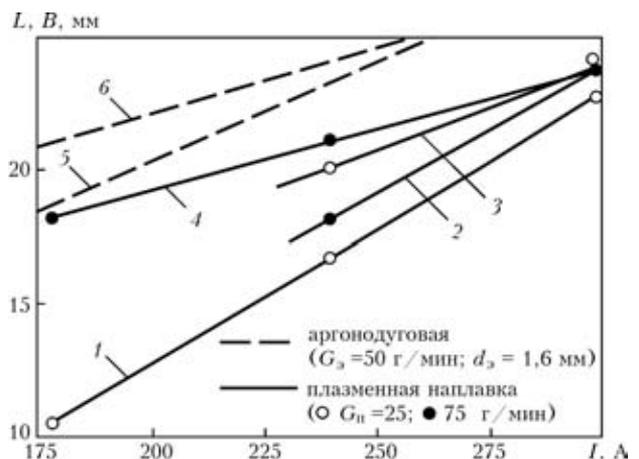


Рис. 3. Влияние силы тока на длину сварочной ванны  $L$  (1, 2) и ширину наплавленного валика  $B$  (3...5)

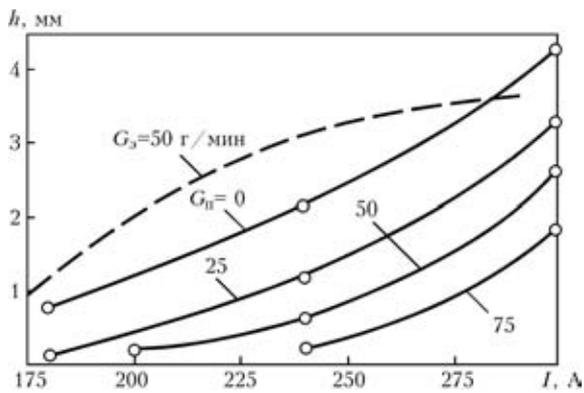


Рис. 4. Зависимость глубины проплавления основного металла от тока наплавки при плазменной (сплошная) и аргонодуговой наплавке плавящимся электродом (штриховая кривая)

а ее масса и размеры становятся меньше (в основном за счет хвостовой части) (рис. 5, 6). При увеличении размаха поперечных колебаний плазмотрона средняя температура ванны остается практически постоянной, ширина валика резко увеличивается, с той же интенсивностью уменьшается длина ванны (рис. 7), а площадь зеркала ванны и глубина проплавления основного металла изменяются мало. Увеличение частоты колебаний плазмотрона приводит к усилению перемешивания жидкого металла и, как следствие, возрастанию конвективной теплоотдачи ванны. С повышением частоты ее температура несколько снижается, уменьшается глубина проплавления основного металла, остальные размеры ванны почти не изменяются.

Увеличение расхода присадочного порошка влияет на различные параметры ванны неоднозначно (рис. 4, 8) — масса ванны при этом увеличивается, ее длина и ширина остаются практически неизменными, глубина проплавления и средняя температура сварочной ванны снижаются. Общее теплосодержание ванны жидкого металла увеличивается в результате более полного использования тепловой мощности дуги.

На рис. 9 показана зависимость температуры и размеров ванны от гранулометрического состава присадочного порошка. При увеличении среднего диаметра частиц порошка средняя температура ванны снижается. Незначительно уменьшается масса ванны и существенно глубина проплавления

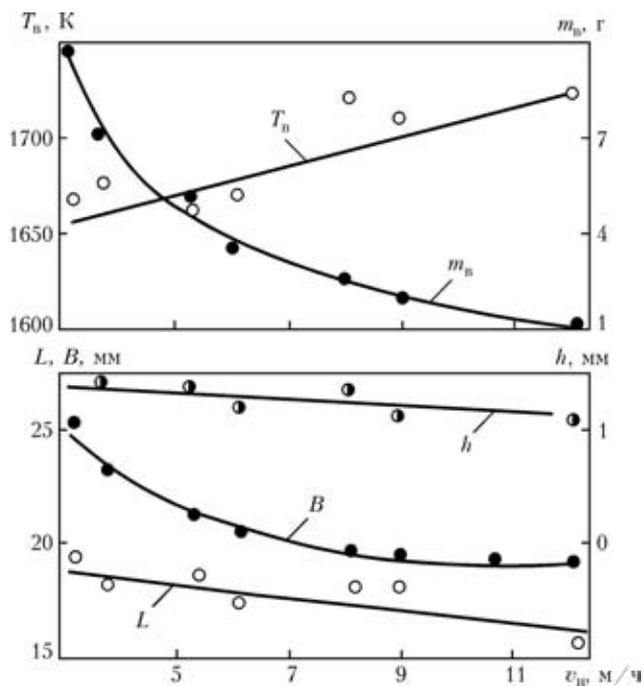


Рис. 5. Влияние скорости плазменной наплавки на характеристики сварочной ванны и основного металла

основного металла. Полученные результаты однозначно связаны с уменьшением нагрева порошка в дуге.

В целом в исследованном диапазоне параметров режима наплавки порошком стали 10X18H10T зафиксировано относительно небольшое изменение средней температуры сварочной ванны в пределах  $1640 \dots 1770$  К, что составляет примерно  $(1,01 \dots 1,08)T_{пл}$  присадочного порошка или в среднем  $1,05T_{пл}$ .

При сопоставлении результатов ранее проведенных исследований нагрева порошка в дуге [8, 11] и данных настоящих исследований установлена корреляция теплового состояния присадочного порошка и параметров ванны. Снижение температуры частиц присадочного порошка, а также увеличение подачи в ванну порошка, нагретого ниже ее температуры, приводят к снижению перегрева жидкого металла и уменьшению проплавления основного металла. Таким образом, возможность регулирования нагрева порошка при плазменной наплавке создает предпосылки управле-

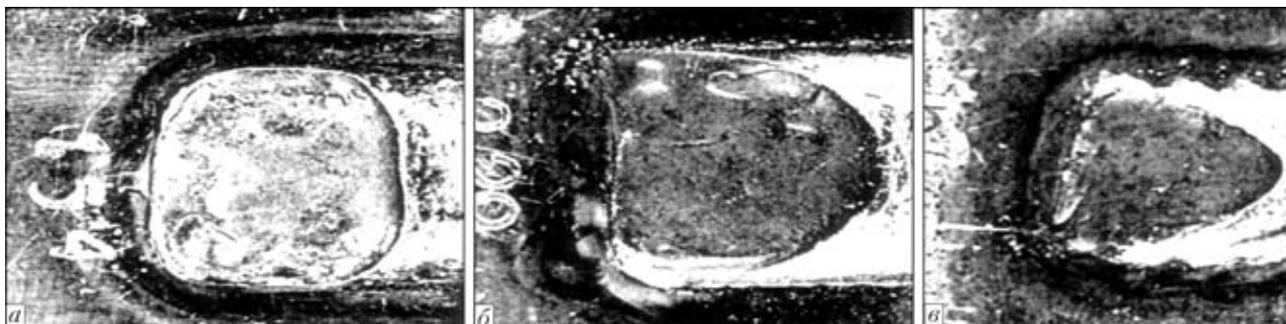


Рис. 6. Форма ванны при различной скорости плазменной наплавки: а — 3,8; б — 6,1; в — 12,1 м/ч

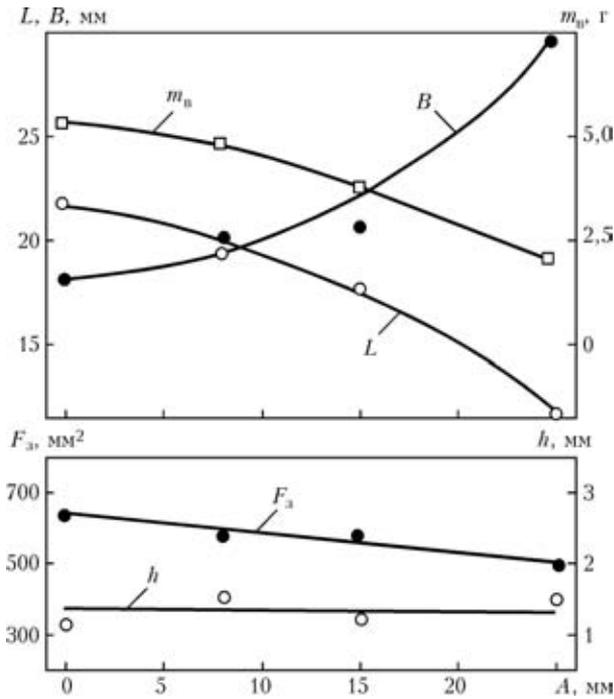


Рис. 7. Влияние размаха колебаний плазматрона  $A$  на характеристики сварочной ванны и основного металла

ния формой и размерами ванны, кристаллизацией наплавленного слоя.

Как указывалось выше, главной особенностью плазменно-порошковой наплавки является введение в сварочную ванну присадочного металла в виде порошка с диаметром частиц 80...300 мкм. Мелкие фракции, пролетая через плазменную дугу, расплавляются, а крупные успевают нагреться до температуры в несколько сот градусов и попадают в сварочную ванну в твердом состоянии. В головной части ванны под действием тепла

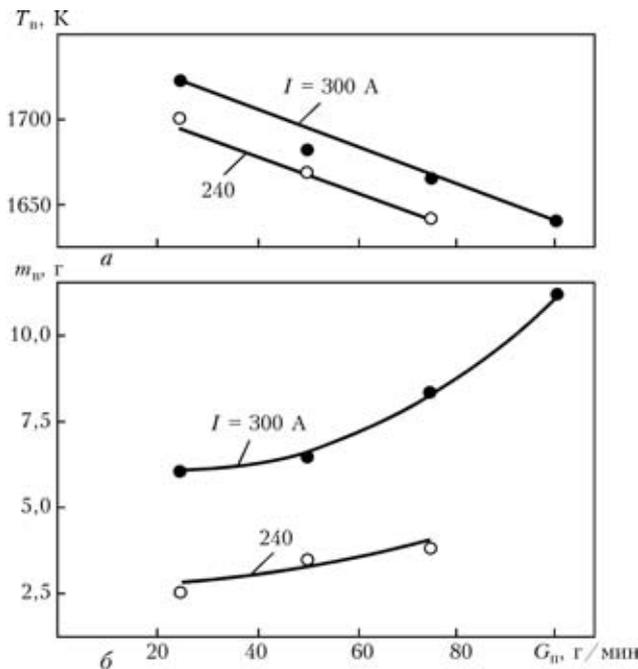


Рис. 8. Средняя температура (а) и масса ванны (б) при различных производительностях и токах плазменной наплавки

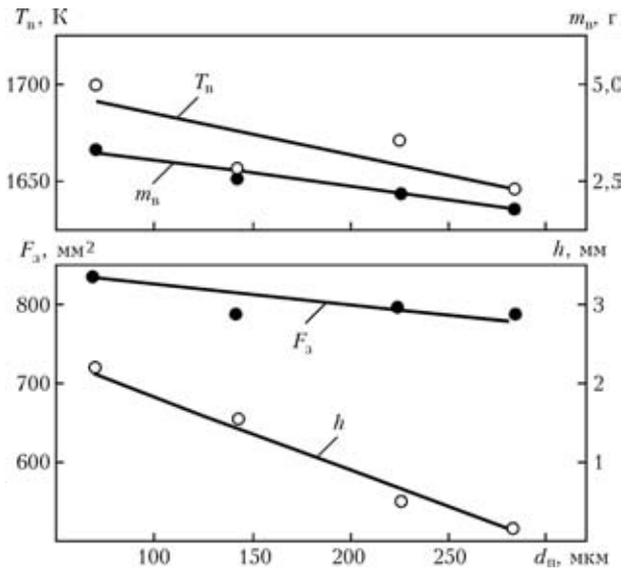


Рис. 9. Влияние грануляции присадочного порошка на характеристики сварочной ванны и основного металла

плазменной дуги они плавятся, а в хвостовой ускоряют охлаждение, действуя как микроохлаждители. В этом случае наблюдается подстуживание ванны — уменьшается ее средняя температура и, что весьма важно, глубина проплавления основного металла. Нерасплавившиеся крупные частицы могут становиться дополнительными центрами кристаллизации. На практике в закристаллизованном слое нерасплавившиеся частицы присадочного металла наблюдаются крайне редко (рис. 10).

Степень воздействия частиц присадочного материала на микроструктуру наплавленного металла должна зависеть от размеров (массы) частиц, их формы и температуры нагрева, а также доли крупных фракций в порошке. Влияние последних аналогично действию дополнительной присадки в форме крупки или гранул, вводимых в сварочную ванну при дуговой сварке под флюсом и других процессах [12, 13].

Образование дополнительных центров кристаллизации измельчает структуру и придает ей разориентированный характер, что может способ-

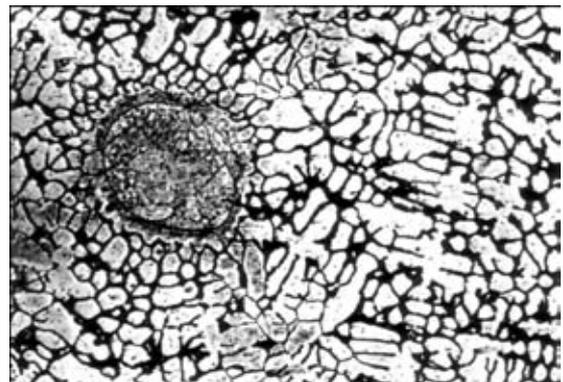


Рис. 10. Микроструктура металла, наплавленного порошком 10X18H10T (видна крупная нерасплавившаяся частица порошка),  $\times 250$



ствовать улучшению эксплуатационных свойств наплавленного металла.

### Выводы

1. Средняя температура сварочной ванны зависит от тока дуги, скорости наплавки, размеров частиц и скорости подачи присадочного порошка. С достаточной для расчетов точностью в среднем ее можно принять равной  $1,05T_{пл}$  порошка.

2. Значения основных геометрических и тепловых параметров ванны жидкого металла при плазменной наплавке с подачей присадочного порошка существенно меньше аналогичных значений, характеризующих ванну при аргонодуговой наплавке плавящимся электродом.

3. Основное влияние на глубину проплавления основного металла оказывает ток дуги, размеры частиц и расход присадочного порошка. Меньшее по сравнению с другими способами проплавление основного металла обеспечивается в результате охлаждения головной части ванны расплавляющимся в ней порошком.

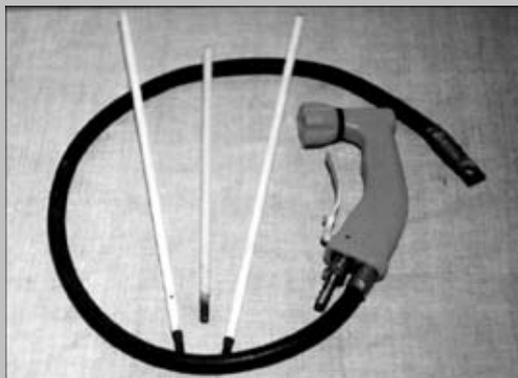
1. Фрумин И. И., Походня И. К. Исследование средней температуры сварочной ванны // Автомат. сварка. — 1955. — № 4. — С. 13–30.
2. Температурный режим сварочной ванны / Н. И. Коперсак, А. М. Сливинский, В. М. Духно, Ю. Н. Каховский // Там же. — 1973. — № 7. — С. 1–3.
3. Влияние предварительного подогрева металла на температуру сварочной ванны / Н. И. Коперсак, А. М. Сливин-

The paper presents the results of an experimental study of temperature, mass, and dimensions of the weld pool and deposited layer in plasma-powder and argon-arc consumable electrode surfacing

- ский, В. М. Духно, Ю. Н. Каховский // Там же. — 1974. — № 11. — С. 9–11.
4. Ерохин А. А. Температурное поле ванны жидкого металла при дуговом нагреве // Свароч. пр-во. — 1982. — № 2. — С. 16–17.
5. Добровольский И. П. Температурное поле ванны при дуговом нагреве // Физ. и химия обработки материалов. — 1982. — № 5. — С. 49–52.
6. Дмитрик В. В. Разработка метода определения температурного режима расплава ванны // Изв.вузов. Машиностроение. — 1999. — № 1. — С. 76–80.
7. Размышляев А. Д. Расчетная оценка влияния конвекции жидкого металла на размеры сварочной ванны при дуговой наплавке // Автомат. сварка. — 1999. — № 8. — С. 22–24.
8. Павленко А. В., Гладкий П. В. Особенности нагрева присадочного порошка в дуге при плазменной наплавке // Там же. — 1990. — № 1. — С. 33–37.
9. Экспериментальное исследование температурного режима сварочной ванны / В. М. Духно, А. М. Сливинский, С. М. Гетманец, В. Т. Котик // Вестн. Киев. политехн. ин-та. Сер. Машиностроение. — 1975. — № 12. — С. 107–109.
10. А. с. 472263 СССР, МКИ G 01 K 7/02. Устройство для определения средней температуры металла в сварочной ванне / В. М. Духно, А. М. Сливинский, В. Т. Котик, С. М. Гетманец. — Заявл. 04.06.73; Бюл. № 20.
11. Гладкий П. В., Павленко А. В., Зельниченко А. Т. Математическое моделирование нагрева порошка в дуге при плазменной наплавке // Автомат. сварка. — 1989. — № 11. — С. 17–21, 54.
12. Ивочкин И. И. Подавление роста столбчатых кристаллов методом «замораживания» сварочной ванны // Свароч. пр-во. — 1965. — № 12. — С. 1–3.
13. Ивочкин И. И., Малышев Б. Д. Сварка под флюсом с дополнительной присадкой. — М.: Стройиздат, 1981. — 175 с.

Поступила в редакцию 11.01.2006

## ЭЛЕКТРОДЫ АНР-Т8 ДЛЯ ПОДВОДНОЙ ЭЛЕКТРОКИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ



Применяются для электрокислородной резки под водой металлоконструкций из конструкционных сталей толщиной до 40 мм на глубине до 60 м. Обеспечивают производительность не менее 300...350 мм реза одним электродом листовой стали толщиной 14 мм. Время горения одного электрода  $\approx 1,5$  мин, масса электрода  $\approx 180$  г. Расход кислорода —  $0,20...0,25$  м<sup>3</sup>/пог. м.

**Применение.** Используются при расчистке русел рек от затонувших кораблей, при ремонте шпунтовых стенок, судоподъеме, выполнении аварийно-спасательных операций и для других работ.

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



# ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАНДАРТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ С УЧЕТОМ РАЗМЕРОВ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В. С. ГИРЕНКО, д-р техн. наук, М. Д. РАБКИНА, канд. техн. наук, С. В. ГИРЕНКО, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложена оценка статической трещиностойкости ( $K_{Ic}$ ,  $\delta_{Ic}$ ) конструкционных сталей и их сварных соединений на базе стандартных механических испытаний и ударной вязкости образцов Шарпи с учетом размеров структурных элементов. Развиваемый подход учитывает различие градиентов деформаций в вершине трещиноподобного дефекта и надреза образца Шарпи, в результате чего структурные параметры, ответственные за инициирование разрушения, находятся в различных условиях нагружения в зависимости от их размеров.

*Ключевые слова:* трещиностойкость, конструкционные стали, сварные соединения, ударная вязкость, вязкое разрушение, критическая деформация, структурные элементы

Инженерная механика разрушения включает два направления:

непосредственное определение критериев трещиностойкости по результатам стандартных испытаний на ударную вязкость образцов Шарпи с привлечением других механических и металлофизических характеристик [1–3];

методы оценки вязкости разрушения на основании так называемой master curve [4].

Первый подход используется при оценке характеристик трещиностойкости в условиях плоской деформации  $K_{Ic}$ ,  $\delta_{Ic}$ . На практике подобные условия с некоторыми ограничениями возникают при развитии поверхностных или внутренних дефектов в направлении толщины конструктивных элементов. Необходимо отметить, что для многих конструкций с токсичными и взрывоопасными эксплуатационными средами основным предельным состоянием, независимо от последующих особенностей разрушения, является разгерметизация. Второе направление, помимо упрощения методов испытания, состоит в оценке вязкости разрушения при распространении сквозных трещин в конструктивных элементах различной толщины. Рационально использовать оба подхода, поскольку они дополняют друг друга. Статья посвящена развитию первого из них.

В работах [1, 2] были рассмотрены эмпирические зависимости между характеристиками механики разрушения и ударной вязкостью. Детальная проверка этих зависимостей (рис. 1, кривая 3) подтвердила их закономерность, но еще раз

подчеркнула наличие большого разброса экспериментальных результатов, что может быть вызвано следующими причинами:

нарушением состояния плоской деформации, что, в первую очередь, характерно для высоких уровней вязкости разрушения (рис. 1);

отсутствием четких критериев в понятии инициирования вязкого разрушения, которое включает множество стадий, начиная от образования микроскопических пор и заканчивая увеличением магистрального разрыва;

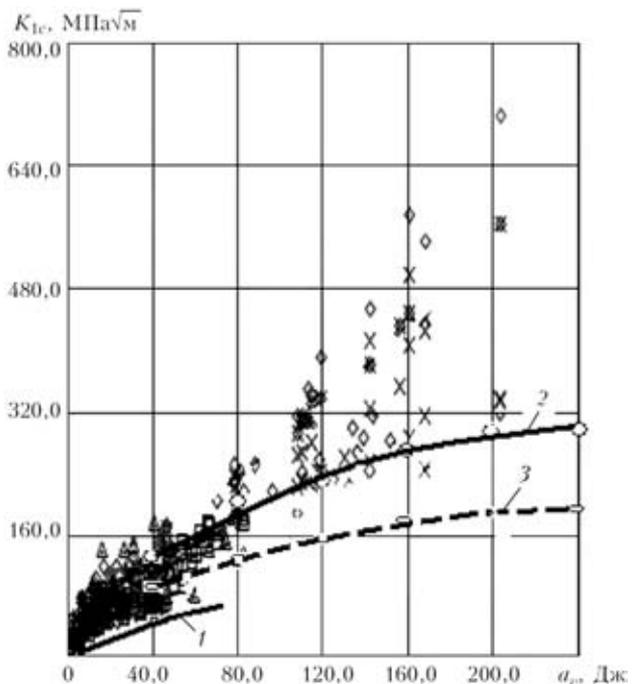


Рис. 1. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных для различных значений коэффициента  $A$ , учитывающего структурные составляющие: 1 —  $A = 0,04$ ; 2 —  $0,2$ ; 3 —  $0,1$  (точки — экспериментальные данные [5])



не вполне адекватной вырезкой образцов Шарпи по отношению к полномасштабным образцам, которые используются для непосредственного определения характеристики  $K_{1c}$ ;

противоречием, возникающим в результате использования методов механики сплошной среды для анализа реальных конструкционных материалов с различными структурными особенностями.

В статье представлена попытка приближенного анализа влияния размеров структурных элементов на оценку характеристики  $K_{1c}$  по результатам стандартных механических испытаний. Краткий анализ рассматриваемой задачи сделан в работе [6], а его предпосылки приведены в работах [7, 8]. При некоторых размерах структурных элементов наблюдается аномальное расхождение между значениями ударной вязкости и характеристиками  $K_{1c}$ . Эта аномалия, по мнению авторов работы [6], связана с различными градиентами напряжений и деформаций в вершине трещиноподобного дефекта и надреза образца Шарпи. Соответственно структурные параметры, ответственные за иницирование разрушения, в зависимости от их размеров, находятся в различных условиях нагружения.

Первоначально анализ взаимосвязей между характеристиками трещиностойкости и работой разрушения образцов Шарпи осуществляется применительно к статическому нагружению и вязкому состоянию материала. В этих условиях зарождение разрушения обычно связывают с критической величиной  $\varepsilon_f$  локальных пластических деформаций:  $\varepsilon = \varepsilon_f$ . Величина  $\varepsilon_f$  определяет условия возникновения разрушения как у вершины трещиноподобного дефекта, так и у вершины надреза образца Шарпи, поскольку для деформационных критериев вязкого разрушения характерна слабая зависимость не только от степени объемности напряженного состояния, но и от скорости нагружения. Это позволяет связать характеристику трещиностойкости  $\delta_{1c}$  с углом изгиба образца Шарпи  $\theta$  (соответствующего началу вязкого разрушения) и, следовательно, с удельной работой зарождения трещины  $a_v^3$ .

Используя соотношение Нейбера, в соответствии с которым произведение коэффициентов концентрации напряжений и деформаций в нелинейной области равно квадрату коэффициента упругих напряжений ( $K_\sigma K_\varepsilon = K_e^2$ ), и учитывая, что для образца Шарпи  $K_e = 3,44$ , можно записать:

$$\frac{\sigma^{\max}}{\bar{\sigma}} \frac{\varepsilon^{\max}}{\bar{\varepsilon}} = 11,82, \quad (1)$$

где  $\sigma^{\max}$  и  $\varepsilon^{\max}$  — локальные, а  $\bar{\sigma}$  и  $\bar{\varepsilon}$  — средние напряжения и деформации.

При плоской деформации истинный сдвиг  $\gamma = 1,5\varepsilon$  и соответственно для материала, упрочняющегося по степенному закону, имеет место следующее соотношение:

$$\sigma = \sigma_T \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_T} \right)^n = \sigma_T \left( \frac{\gamma}{1,5\varepsilon_T} \right)^n, \quad (2)$$

где  $n$  — коэффициент деформационного упрочнения).

При изгибе образца Шарпи средняя деформация сдвига вдоль каждой из полос скольжения  $\gamma \approx \theta/2$ , где  $\theta$  — угол изгиба. Поэтому зависимость имеет следующий вид:

$$\left( \frac{\varepsilon^{\max}}{\varepsilon_T} \right)^{1+n} = 11,82 \left( \frac{\theta}{2 \cdot 1,5\varepsilon_T} \right)^{1+n}. \quad (3)$$

Принимая во внимание, что распределение упругих напряжений на некотором расстоянии  $r$  от вершины надреза с конечным радиусом закругления  $\rho_0$  выражается приближенной зависимостью [9]

$$\sigma_{Yr} = \sigma K_e \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_0 + 4r}}, \quad (4)$$

можно записать выражение для определения пластических деформаций  $\varepsilon$  на расстоянии  $r$  от вершины надреза образца Шарпи:

$$\left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_T} \right)^{1+n} = 11,82 \frac{1}{1 + 4 \frac{r}{\rho_0}} \left( \frac{\theta}{3\varepsilon_T} \right)^{1+n}. \quad (5)$$

Из выражения (5) определяют угол изгиба образца Шарпи, который соответствует началу вязкого разрушения. Обычно размеры структурного элемента при анализе условий разрушения учитываются следующим образом: расстояние от вершины трещины до точки определения напряжений или деформаций  $r$  принимается равным характерному размеру  $r^*$ . С учетом этого связь между критическим углом изгиба образца Шарпи  $\theta_c$ , который соответствует началу вязкого разрушения, и критической величиной локальных пластических деформаций выражается в виде

$$\left( \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_T} \right)^{1+n} = 11,82 \frac{1}{1 + 4 \frac{r^*}{\rho_0}} \left( \frac{\theta_c}{3\varepsilon_T} \right)^{1+n}. \quad (6)$$

Напряжения и деформации внутри пластической зоны у вершины трещиноподобного дефекта описывают следующим образом:



$$\sigma = \sigma_T \left( \frac{R}{r} \right)^{1+n}, \quad \varepsilon = \varepsilon_T \left( \frac{R}{r} \right)^{1+n}, \quad (7)$$

где  $R$  — размер пластической зоны.

С учетом того, что при развитых пластических деформациях в условиях плоского деформированного состояния  $\delta_1 \approx 2R\varepsilon_T$ , следует

$$\left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_T} \right)^{1+n} = \frac{\delta_1}{2\varepsilon_T r}. \quad (8)$$

Рассматривая критические значения деформаций и перемещений, получаем следующую зависимость:

$$\left( \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_T} \right)^{1+n} = \frac{\delta_{1c}^{\max}}{2\varepsilon_T r^*}, \quad (9)$$

где  $\delta_{1c}^{\max}$  — критическое раскрытие вершины трещины в момент инициирования вязкого разрушения.

Выражение (9), представленное в виде

$$\delta_{1c}^{\max} = 2r^* \varepsilon_T \left( \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_T} \right)^{1+n}, \quad (10)$$

выявляет физический смысл характеристики  $\delta_{1c}^{\max}$  при вязком разрушении — предельное удлинение удвоенного структурного элемента, которое при прочих равных условиях тем больше, чем больше деформационное упрочнение материала.

Объединяя выражения (6) и (10), получаем следующую зависимость между критическим углом изгиба образца Шарпи  $\theta_c$  и деформационной характеристикой трещиностойкости  $\delta_{1c}^{\max}$ :

$$\begin{aligned} \delta_{1c}^{\max} &= 11,82\varepsilon_T \left( \frac{2r^*}{1 + \frac{4}{\rho_0} r^*} \right) \left( \frac{\theta_c}{3\varepsilon_T} \right)^{1+n} = \\ &= 23,64\varepsilon_T \beta \left( \frac{\theta_c}{3\varepsilon_T} \right)^{1+n}. \end{aligned} \quad (11)$$

Обозначив структурный параметр  $r^*/(1 + \frac{4}{\rho_0} r^*) = \beta$  и с учетом того, что для образцов Шарпи  $\rho = 0,25$ , можно непосредственно установить связь между  $\delta_{1c}^{\max}$  и удельной работой зарождения вязкой трещины в образце Шарпи  $a_v^3$ .

При отсутствии у материала выраженного деформационного упрочнения ( $n \rightarrow 0$ ):

При отсутствии у материала выраженного деформационного упрочнения ( $n \rightarrow 0$ ):

$$a_v^3 = \frac{M_{o.T} \theta_c}{t(B-l)} = \frac{B-l}{4} 1,25 \sigma_T \theta_c, \quad (12)$$

где  $l$  — глубина надреза;  $(B-l)$  — размер ослабленного сечения;  $t$  — толщина образца;  $M_{o.T}$  — изгибающий момент при общей текучести ослабленного сечения.

Чтобы учесть влияние деформационного упрочнения, которое может быть существенным у сталей низкой и средней прочности, необходимо напряжения текучести принять зависимыми от угла изгиба образца Шарпи:

$$M_{o.T}(\theta) = \frac{t(B-l)^2}{4} 1,25 \sigma_T \left( \frac{\theta}{3\varepsilon_T} \right)^n. \quad (13)$$

При этом удельная работа зарождения вязкой трещины при  $(B-l) = 8$  мм:

$$\begin{aligned} a_v^3 &= \frac{1}{t(B-l)} \int_0^{\theta_c} M_{o.T}(\theta) d\theta = (B-l) 1,25 \frac{\sigma_T}{4} \int_0^{\theta_c} \left( \frac{\theta}{2 \cdot 1,5 \varepsilon_T} \right)^n d\theta = \\ &= 7,5 \frac{\sigma_T \varepsilon_T}{(1+n)} \left( \frac{\theta_c}{3\varepsilon_T} \right)^{1+n}. \end{aligned} \quad (14)$$

Объединяя выражения (11) и (14), получаем следующую зависимость (без учета деформационного упрочнения):

$$\delta_{1c}^{\max} \cong 3\beta \frac{a_v^3}{\sigma_T}, \quad (15)$$

с учетом деформационного упрочнения

$$\delta_{1c}^{\max} \cong 3(1+n)\beta \frac{a_v^3}{\sigma_T}. \quad (16)$$

Рассмотрим зависимость между удельной работой распространения вязкой трещины в образце Шарпи  $a_v^p$  и деформационной характеристикой трещиностойкости  $\delta_{1c}^{\max}$ . В качестве критерия сопротивления материала развитию вязкой трещины может быть использован критический угол раскрытия трещины. Тот факт, что он практически постоянен при ее возрастании, существенно облегчает анализ.

При трехточечном изгибе связь между раскрытием вершины стационарной трещины  $\delta_1$ , прогибом образца  $V$  и углом поворота  $\theta$  определяется следующими геометрическими соотношениями:



$$\frac{\theta}{2} = \frac{V}{l_0} = \frac{\delta_1}{2r_0}, \quad (17)$$

где  $r_0$  — расстояние от вершины трещины до центра вращения;  $l_0$  — расстояние до опоры.

Представим, что произошло некоторое незначительное подрастание трещины на величину  $\Delta l$ . Раскрытие трещины в точке, соответствующей первоначальному положению ее вершины, обусловленное подрастанием, обозначим  $\delta_1^{\Delta l}$ . Соответственно

$$\frac{\theta^{\Delta l}}{2} \cong \frac{V^{\Delta l}}{l_0} \cong \frac{\delta_1^{\Delta l}}{2r_0^{\Delta l}}. \quad (18)$$

Используя результаты, полученные ранее [10], можно записать:

$$\frac{\theta^{\Delta l}}{2} \cong \frac{V^{\Delta l}}{l_0} \cong \frac{\Delta l \frac{\sigma_B}{\sigma_T} \frac{n}{(1-n)^2}}{2r_0^{\Delta l}}. \quad (19)$$

Переходя теперь от изгибаемого образца с трещиной к образцу с надрезом Шарпи, следует заметить, что начальные стадии развития разрушения от надреза и трещины могут иметь некоторые отличия, однако в дальнейшем процессы становятся идентичными. Это позволяет использовать зависимости, подобные предыдущей, для анализа развития вязкого разрушения в образце Шарпи.

Величина  $r_0^{\Delta l}$  может быть оценена по результатам численного анализа работы [11]: при изменении отношения длины трещины (включая длину надреза) к ширине образца от 0,3 до 0,8 значение меняется от  $0,45(B-l)$  до  $0,43(B-l)$ . Коэффициент стеснения пластических деформаций изменяется в более широких пределах  $L = 1,23 \dots 1,29$ ;  $L_{cp} = 1,26$  [11]. Для простоты можно считать, что центр вращения находится посередине сечения шириной  $h$ , ослабленного растущей трещиной. Зависимость (19) при бесконечно малом значении  $\theta$  можно представить в следующем виде:

$$d\theta = 2 \frac{\sigma_B}{\sigma_T} \frac{n}{(1-n)^2 h} dh. \quad (20)$$

На основании детального анализа можно считать, что максимальная нагрузка на стадии распространения разрушения определяется ослаблением сечения и деформационным упрочнением материала, достигнутым к моменту зарождения вязкой трещины. Изгибающий момент при зарождении вязкой трещины, когда угол изгиба образца

$\theta$  принимает значение  $\theta_c$ , может быть определен следующим образом:

$$M^{\max}(\theta_c) = \frac{t(B-l)^2}{4} 1,26 \sigma_T \left( \frac{\theta_c}{3\varepsilon_T} \right)^n. \quad (21)$$

Соответственно максимальный изгибающий момент, совершающий работу при распространении вязкой трещины, равен

$$M_p^{\max}(h) = 1,26 \sigma_T \left( \frac{\theta_c}{3\varepsilon_T} \right)^n \frac{th^2}{4}. \quad (22)$$

С учетом выражений (19) и (22) можно определить удельную работу распространения вязкой трещины в образце Шарпи:

$$\begin{aligned} a_v^p &= \frac{1}{t(B-l)} \int_0^{\theta_c} M(\theta) d\theta = \frac{2 \frac{\sigma_B}{\sigma_T} \frac{n}{(1-n)^2} B^{-l} M_p^{\max}(h)}{t(B-l)} \int_0^{\theta_c} \frac{dh}{h} = \\ &= \frac{\sigma_B}{\sigma_T} \frac{n}{(1-n)^2} 1,26 \sigma_T \left( \frac{\theta_c}{3\varepsilon_T} \right)^n \frac{B-l}{4}. \end{aligned} \quad (23)$$

Объединив (11) и (23), можно записать

$$\delta_{1c}^{\max} = 9,4 \varepsilon_T \beta \frac{(1-n)^2}{n} \left( \frac{\theta_c}{3\varepsilon_T} \right) \frac{a_v^p}{\sigma_B}. \quad (24)$$

Принимая во внимание, что угол изгиба  $\theta_c$  достигается при нагрузках, близких к максимальным, когда средние напряжения течения приближаются к временному сопротивлению материала, а истинные деформации  $\varepsilon \approx \frac{n}{1-n}$ , можно считать, что

$$\frac{\theta_c}{3\varepsilon_T} \cong \frac{\gamma}{1,5\varepsilon_T} \cong \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_T} \cong \frac{n}{(1-n)\varepsilon_T}. \quad (25)$$

Тогда связь между характеристикой трещиностойкости  $\sigma_{1c}^{\max}$  и удельной работой развития вязкой трещины в образце Шарпи можно выразить в следующей форме:

$$\delta_{1c}^{\max} = 9,4 \beta (1-n) \frac{a_v^p}{\sigma_B}. \quad (26)$$

Без учета деформационного упрочнения зависимость (26) имеет следующий вид:

$$\delta_{1c}^{\max} = 9,4 \beta \frac{a_v^p}{\sigma_B}. \quad (27)$$

Полученные результаты позволяют перейти к заключительному этапу анализа. Применительно



к материалам со слабым деформационным упрочнением связь между удельной работой разрушения на «верхнем шельфе»  $a_v^{\max}$  и характеристикой трещиностойкости  $\delta_{1c}^{\max}$  с учетом выражений (15) и (27) имеет вид

$$\delta_{1c}^{\max} = 2,3\beta \frac{a_v^{(s)}}{\sigma_T} \quad (28)$$

Пренебрегая влиянием параметра  $n$  на конечные результаты (поскольку эта характеристика не нормируется в инженерной практике, а влияние ее незначительно), результат можно записать в следующем виде:

$$\delta_{1c}^{\max} \cong 3 \frac{\beta}{(1 + 0,33 \frac{\sigma_B}{\sigma_T})} \frac{a_v^{\max(s)}}{\sigma_T} \quad (29)$$

Приведенный выше анализ проводили применительно к статическому нагружению, что в зависимостях (28) и (29) подчеркнута с помощью придания значению  $a_v^{\max}$  символа  $s$ . Предполагалось, что все основные физико-механические характеристики, входящие в зависимость (29) ( $\delta_{1c}^{\max}$ ,  $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$ ,  $a_v^{\max(s)}$ ), получены в одинаковых условиях. Следовательно, они должны характеризовать свойства металла при одинаковых скоростях нагружения и, естественно, при температурах, обеспечивающих полностью вязкое разрушение как образца с трещиной, так и образца Шарпи. Поскольку критерий  $\delta_{1c}^{\max}$  является характеристикой статической трещиностойкости материала, значения  $a_v^{\max(s)}$ ,  $\sigma_T$  и  $\sigma_B$  также должны относиться к статическому нагружению, что отражает индекс  $s$ . Это требование может быть оправдано как с теоретической, так и с инженерной точек зрения по отношению ко всем перечисленным механическим характеристикам, за исключением  $a_v^{\max}$ . При определении последнего ударное нагружение необходимо, прежде всего, для обеспечения состояния плоской деформации на всех стадиях деформирования образца Шарпи. Это не играет решающей роли при вязком разрушении, но имеет принципиальное значение для правильного воспроизведения условий вязкохрупкого перехода при плоском деформированном состоянии. Кроме того, именно испытания на ударную вязкость являются основной сдаточной характеристикой материалов.

Таким образом, в формуле (29) необходимо сохранить статические значения всех механических характеристик за исключением значения

$a_v^{\max(s)}$ , которое должно быть скорректировано с учетом динамических эффектов таким образом, чтобы вместо него можно было без существенных погрешностей использовать значение ударной вязкости.

Влияние скорости нагружения на удельную работу разрушения образца Шарпи можно охарактеризовать коэффициентом  $D$ :

$$D = b \frac{a_v^{\max(s)}}{a_v^{\max(d)}}, \quad (30)$$

где  $a_v^{\max(s)}$  — удельная работа вязкого разрушения образца Шарпи в условиях статического нагружения;  $a_v^{\max(d)}$  — ударная вязкость, полученная при испытаниях образца Шарпи в температурном диапазоне, соответствующем «верхнему шельфу»,  $b$  — безразмерный коэффициент пропорциональности.

Анализ экспериментальных данных, относящихся к сталям с различным деформационным упрочнением, показывает, что коэффициент  $D$  практически прямо пропорционален отношению  $\sigma_T/\sigma_B$ . Значение  $b$  изменяется от 0,75 до 1. С учетом этого зависимость (29) можно окончательно записать в следующем виде (при  $b = 1$  и

$$\delta_{1c} = \frac{K_{1c}^2(1 - v^2)}{2E\sigma_T}):$$

$$\delta_{1c} = 3 \frac{\beta \frac{\sigma_T}{\sigma_B}}{(1 + 0,33 \frac{\sigma_B}{\sigma_T})} \frac{a_v}{\sigma_T}, \quad (31)$$

$$K_{1c} = \sqrt{6\beta \frac{E}{1 - v^2} \frac{1}{(1 + 0,33 \frac{\sigma_B}{\sigma_T})} \frac{\sigma_T}{\sigma_B} a_v}, \quad (32)$$

$$\text{где } \beta = \frac{r^*}{1 + \frac{4}{\rho_0} r^*}.$$

Использование формул, полученных с применением деформационных критериев, возможно не только в температурном диапазоне верхнего шельфа, но и переходных температур, где также наблюдается микровязкая составляющая [11,12]. Кроме того, такая возможность вытекает из результатов работ [1–3, 5, 6], поскольку для большинства конструкционных материалов, не имеющих структурных аномалий, наблюдается устойчивая корреляция между характеристиками  $K_{1c}$ ,



$\delta_{1c}$  и ударной вязкостью образцов Шарпи. Следовательно, можно утверждать, что стеснение пластических деформаций в обоих случаях практически одинаково и соответственно при испытаниях на ударную вязкость воспроизводятся условия вязкохрупкого перехода, характерные для плоского деформированного состояния в зоне трещин при статическом нагружении.

Полученные формулы (31), (32) нуждаются в некоторой дополнительной корректировке. Зависимость (10) приводит к следующему результату: с уменьшением размеров структурных элементов  $r^*$  при прочих равных условиях деформационная характеристика трещиностойкости  $\delta_{1c}$  стремится к нулю, что противоречит физическому смыслу. Учитывая результаты работы [13], целесообразно использовать понятие эффективной остроты трещины. Смысл заключается в том, что для формирования наиболее неблагоприятных полей деформаций и напряжений вблизи вершины трещины необходимо ее некоторое притупление. Соответственно очаг разрушения находится на некотором расстоянии  $x$  от вершины дефекта, а вязкость разрушения на нижнем шельфе ее температурной зависимости ограничена определенным уровнем, который необходимо учитывать при построении расчетных моделей. В связи с этим расчетному структурному параметру  $\beta$  целесообразно придать следующую форму:

$$\beta = \frac{x + r^*}{1 + \frac{4}{\rho_0} r^*} \quad (33)$$

Для высокопрочных сталей радиус зоны  $x \cong 0,01$  мм. Для низкопрочных материалов это значение может быть несколько большим (до 0,05 мм).

Для проверки полученных результатов целесообразно использовать экспериментальные данные работы [6]. Их сопоставление со значениями  $K_{1c}$ , рассчитанными по формулам (32), (33) при  $x = 0,01$  мм, приведено на рис. 2. Можно убедиться, что согласование результатов вполне удовлетворительное.

Рассмотрим возможную роль структурных особенностей материалов в разбросе экспериментальных данных, приведенных на рис. 1. Учитывая отсутствие полной информации о физико-механических свойствах сталей в работе [5], могут быть определены только формальные крайние границы расчетных значений  $K_{1c}$ . Для этого зависимость (32) целесообразно представить в следующей форме:

$$K_{1c} = \sqrt{A \frac{E}{1 - \nu^2} a_v}$$

где

$$A = 6 \left( \frac{x + r^*}{1 + 16r^*} \right) \left( \frac{\sigma_T / \sigma_B}{1 + 0,33 \frac{\sigma_B}{\sigma_T}} \right); x = 0,01 \text{ мм.}$$

Принимая минимальный размер структурного элемента  $r^* = 0,01$  мм, при максимальном деформационном упрочнении ( $\sigma_T / \sigma_B = 0,6$ ) получаем  $A \approx 0,04$ .

Оценивая наименее консервативную зависимость  $K_{1c}$  от  $a_v$ , принимаем  $r^* = 0,1$  мм при отношении  $\sigma_T / \sigma_B = 1$ . При этом  $A \approx 0,2$ . Эмпирическое значение коэффициента  $A$  в работе [1] равно 0,1...0,157.

Представленное на рис. 1 приближенное решение при минимальном значении  $A$  обеспечивает консервативную оценку для всей области разброса экспериментальных данных. В то же время кривая 2 удовлетворительно описывает верхнюю границу этого разброса. Данные, лежащие выше этой кривой, объясняются нарушением состояния плоской деформации при оценке критерия  $K_{1c}$ .

В заключение можно отметить, что несмотря на ряд приближенных допущений, оценка влияния размеров структурных параметров на взаимосвязь между характеристиками трещиностойкости  $K_{1c}$  и ударной вязкостью хрупких высокопрочных ста-

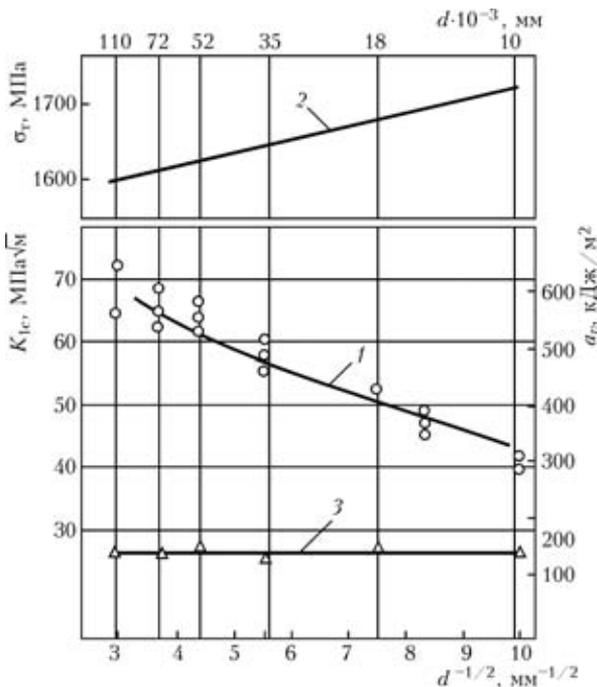


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений  $K_{1c}$ ,  $\sigma_T$ ,  $a_v$  при различных размерах структурных элементов: кривая 1 — расчетные значения  $K_{1c}$ ; 2, 3 — соответственно экспериментальные значения  $\sigma_T$  и  $a_v$ ; кружки — экспериментальные значения  $K_{1c}$



лей оказалась вполне приемлемой. Удовлетворительные результаты дает также анализ возможных границ разброса экспериментальных результатов. Вместе с тем необходимо подчеркнуть, что когда речь идет о низкопрочных сталях с высокой вязкостью разрушения, картина зарождения как вязких, так и квазихрупких трещин должна меняться. В подобных случаях инициирование разрушения в поле максимальных деформаций и напряжений связано с растрескиванием нескольких структурных элементов. В рамках приведенного анализа это изменяет представление не только о размерах комплексного структурного элемента, но и параметра  $x$ . Соответственно следует ожидать, что более вязкие конструкционные материалы значительно меньше зависят от размеров структурных элементов, чем следует из рис. 2. Такое предположение соответствует наличию устойчивых связей между  $K_{1c}$  и  $a_v$  для многих относительно вязких конструкционных материалов. Рассмотренный подход может быть использован, в частности, при техническом диагностировании сварных конструкций.

1. Гиренко В. С., Дядин В. П. Зависимости между ударной вязкостью и критериями механики разрушения  $\delta_{1c}$  и  $K_{1c}$  конструкционных сталей и их сварных соединений // Автомат. сварка. — 1985. — № 9. — С. 13–20.
2. Гиренко В. С., Дядин В. П. Зависимости между ударной вязкостью и критериями механики разрушения кон-

струкционных сталей и их сварных соединений // Там же. — 1986. — № 10. — С. 61–62.

3. Гиренко В. С. Некоторые подходы к оценке статической трещиностойкости металлических материалов и сварных соединений // Там же. — 1995. — № 9. — С. 74–77.
4. ASTM Standard Test Method E 1921-97.
5. Phaal R., Macdonald K. A., Brown P. A. Correlation between fracture toughness and Charpy impact energy // TWI. — 1993. — 5605(71).
6. Panasyuk V. V., Romaniv O. M. Charpy and fracture toughness data: limitations and advantages in evaluation of the embrittlement of metals // ESSIS, Charpy Centenary Conf., Poitiers, Paris, 2–5 Oct., 2001. — Vol. 2. — P. 603–610.
7. Романив О. Н., Крыськив А. С., Ткач А. Н. О некоторых случаях различной структурной чувствительности ударной вязкости и вязкости разрушения // Физ.-хим. мех. материалов. — 1978. — № 6. — С. 64–71.
8. Применение перегрева при закалке для повышения трещиностойкости высокопрочных сталей / О. Н. Романив, А. Н. Ткач, Я. Н. Гладкий, Ю. В. Зима // Там же. — 1976. — № 5. — С. 41–48.
9. Tetelman A. S., McEvily A. J. Fracture of structural materials. — New York, 1967. — 68 p.
10. Гиренко В. С., Дядин В. П. Корреляция характеристик трещиностойкости материалов и сварных соединений с результатами стандартных механических испытаний // Автомат. сварка. — 1990. — № 6. — С. 1–4.
11. Сиратори М., Миеси Т., Манусита Х. Вычислительная механика разрушения. — М.: Мир, 1986. — 334 с.
12. Романив О. Н. Структурная механика разрушения — новое перспективное направление в проблеме разрушения металлов // Физ.-хим. мех. материалов. — 1981. — № 100. — С. 28–44.
13. Malkin J., Tetelman A. S. Relation between  $K_{1c}$  and microscopic strength for low alloy steels // Eng. Frac. Mech. — 1971. — Vol. 3. — P. 151–167.

An evaluation of static crack resistance ( $K_{1c}$ ,  $\delta_{1c}$ ) of structural steels and their welded joints is proposed, based on standard mechanical testing and impact toughness of Charpy samples, allowing for the dimensions of structural elements. The developed approach allows for the difference in the deformation gradients in the tip of a crack-like defect and notch of a Charpy sample, which results in that the structural parameters, responsible for fracture initiation, are under different loading conditions, depending on their dimensions.

Поступила в редакцию 22.02.2006

### 5-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ»

23–28 сентября 2006

г. Санкт-Петербург, Россия

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НАУКЕ  
И ИННОВАЦИЯМ  
КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ  
г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГА  
ЦНИИ РОБОТОТЕХНИКИ И ТЕХНИЧЕСКОЙ  
КИБЕРНЕТИКИ

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И СВАРОЧНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ СПбГПУ  
РОССИЙСКАЯ ЛАЗЕРНАЯ АССОЦИАЦИЯ  
ЕВРОПЕЙСКОЕ ОПТИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО  
СОЮЗ НЕМЕЦКИХ ИНЖЕНЕРОВ

#### Тематика:

- физические основы лучевых технологий;
- математическое моделирование лучевых технологий;
- технологии резки, прошивки отверстий и маркировки;
- технологии сварки, наплавки, термоупрочнения и прототипирования;
- оборудование для лучевых технологий;
- контроль качества и безопасность.

#### Контакты:

Россия, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29  
Институт лазерных и сварочных технологий СПбГПУ  
Тел.: +7(812) 552-98-43; факс: +7(812) 535-46-98  
E-mail: ilist@lrc.ru Web-site: www.lrc.ru



## К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ПОДВОДНОЙ СВАРКЕ

**И. О. СКАЧКОВ**, канд. техн. наук, **А. Е. ПИРУМОВ**, инж. (НТУУ «Киевский политехнический институт»),  
**С. Ю. МАКСИМОВ**, канд. техн. наук, **Е. А. ПРИЛИПКО**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

С использованием искусственных нейронных сетей проведена оценка качества сварных соединений, выполненных под водой, с четырьмя типами дефектов сборки: превышением кромок, изменением расстояния горелка – деталь, изменением зазора между деталями и наличием прихваток. Показана эффективность применения нейронных сетей для указанных типов дефектов, за исключением изменения зазора между свариваемыми кромок.

*Ключевые слова:* подводная сварка, нестационарные возмущения, металл шва, контроль качества, электрические параметры, нейронные сети

Основной задачей производства сварных конструкций является стабилизация качества соединений во всей партии однотипных изделий. Наиболее распространенный способ решения этой задачи — оптимизация параметров режима и минимизация уровня технологических возмущений. Получить сварные соединения с параметрами качества, не худшими чем предельно допустимые по соответствующим стандартам или техническим условиям, позволяющим табличные модели, связывающие показатели качества с параметрами сварочного режима. Однако при повышении требований к сварному соединению, определенных конструктивных особенностях изделия и наличии возмущений применение таких моделей не всегда может обеспечить заданное качество. Устранение влияния возмущений вследствие разнообразия природы их возникновения невозможно. Так, при сварке под водой на процесс формирования сварного шва влияет целый комплекс нестационарных возмущений. Например, невозможно устранить вероятность появления возмущений, возникающих вследствие действия на человека таких факторов окружающей среды, как плохая видимость, течение, высокое давление. В связи с этим большое значение приобретает контроль качества сварных соединений, часто являющихся особо ответственными. Однако в большинстве случаев контроль качества сварного соединения, выполненного мокрой подводной сваркой, осуществляется наружным осмотром или в случае ремонта трубопроводов проверкой соединения на герметичность избыточным давлением. Применение общепринятых аппаратных средств в условиях водной среды связано с большими техническими

трудностями. В связи с этим разработка простой в реализации и надежной в эксплуатации технологии объективного контроля качества является наиболее актуальной. Такая технология должна обеспечивать контроль качества формирования шва в реальном масштабе времени или непосредственно после окончания сварки и не требовать погружения под воду ни оборудования, ни контролера.

Информацию, необходимую для оценки качества сварного соединения, можно получать путем анализа физических параметров сварочной дуги, включая электрические [1]. Использование последних требует минимальных аппаратных средств и не увеличивает, как правило, массогабаритные показатели рабочих узлов сварочных установок. Кроме того, сварочная дуга практически безынерционна. Для подводной сварки особенно привлекательным является возможность измерения сварочных параметров с обеспечивающего судна.

Сущность технологии контроля качества сварного соединения по электрическим параметрам дуги заключается в сопоставлении формы осциллограмм тока и напряжения дуги с изменением показателей качества по длине сварного шва. Поскольку большинство дефектов последнего закладывается на стадии образования и кристаллизации сварочной ванны, состояние одного из электродов должно отражать особенности протекания этого процесса. Однако наличие как искусственных, так и естественных обратных связей затрудняет интерпретацию формы осциллограмм для определения качества сварного соединения, поскольку абсолютные значения отклонений в форме осциллограмм весьма незначительны. Таким образом, необходимо оценивать форму кривой тока и напряжения за некоторый период времени горения дуги и выявлять отклонения, существенные с точ-



ки зрения формирования шва. В связи с огромным количеством непредсказуемых и не подлежащих измерению возмущающих факторов процесс горения дуги под водой можно рассматривать как стохастический. Определение качества сварного шва может быть осуществлено путем разделения фрагментов осциллограмм на группы, соответствующие определенным видам дефектов. Таким образом, задача контроля качества по электрическим параметрам дуги сводится к задаче кластеризации. Необходимо также учитывать, что электрическая дуга (независимо от способа дуговой сварки) имеет естественную нелинейность. Существенную нелинейность имеет также свариваемое изделие, поскольку его теплофизические и электрические свойства зависят от температуры. Преимущественно нелинейными системами являются также источники питания дуги. Таким образом, должна решаться задача кластеризации последовательностей, сформированных нелинейной стохастической системой.

Любые возмущения непременно приводят к изменениям флуктуаций электродных пятен и, следовательно, сказываются на электрических параметрах дуги. Поскольку эти флуктуации имеют случайный характер, то и анализ их влияния целесообразно проводить по статистическим оценкам. Наиболее приемлемой оценкой, позволяющей адекватно оценить интенсивность флуктуации электродных пятен при решении поставленной задачи, является дисперсия регистрируемых значений тока сварки и напряжения дуги.

Одним из современных способов решения задачи является использование нейронных сетей. Выбор этого механизма кластеризации данных определяется прежде всего такими особенностями нейронных сетей, как их способность к обобщению и терпимость к различного рода помехам. Математический аппарат и программное обеспечение для симуляции искусственных нейронных сетей на персональных компьютерах в достаточной мере разработаны и доступны.

Цель данной работы заключалась в определении возможности оценки эффективности применения нейронных сетей в качестве инструмента

дистанционного мониторинга качества процесса мокрой подводной сварки.

Эксперименты проводили для случая автоматической дуговой подводной мокрой сварки. Образцы из низкоуглеродистой конструкционной листовой стали толщиной 10 мм, имеющие стандартную V-образную разделку кромок, сваривали встык с использованием порошковой проволоки ППС-АН2, разработанной и изготовленной в ИЭС им. Е. О. Патона. В качестве источника питания использовали сварочный агрегат типа АСУМ-400. Эксперименты проводили в пресной воде в специальной камере высокого давления в условиях, эквивалентных погружению на глубину 10 м.

Регистрацию тока и напряжения на дуге осуществляли с помощью информационно-измерительной системы (ИИС) на базе персонального компьютера, модуля аналогового ввода E-140 производства компании «L-Card» (Россия), а также датчиков тока и напряжения компании «LEM» (Швейцария), работа которых основана на эффекте Холла. Используемые датчики обеспечивают нормализацию и гальваническую развязку входного сигнала. Разработанная ИИС (рис. 1) позволяет осуществлять непрерывный анализ и запись на электронные носители показателей параметров, регистрируемых во время всего цикла сварки, и обрабатывать полученную информацию.

Частота АЦП 10 кГц на канал выбрана на основании литературных данных работы [2] и предварительных собственных экспериментов. Для повышения точности измерений осуществлены меры защиты измерительных цепей от электромагнитных помех такие, как применение витых пар, установка на вход АЦП резисторов (рис. 2) для уменьшения влияния влияния синфазной помехи и др. [3]. В связи с необходимостью проведения контроля с поверхности воды напряжение дуги измеряли на клеммах источника питания (рис. 2). Запись и обработку данных проводили с помощью программы File Recorder v.3.2 из специализированного пакета PowerGraph v.3.2, ориентированного на работу с продукцией фирмы «L-Card», под управлением операционной системы Windows XP. С помощью меню программной среды можно осуществлять настройку каждого входного канала АЦП путем введения частоты сбора данных и уровня входного сигнала.

Оценку качества сварных соединений проводили на основе четырех видов возмущений, которые ухудшают качественные характеристики сварного шва и наиболее часто встречаются при сварке, а именно: превышение кромок свариваемых деталей; изменение расстояния горелка – деталь; изменение зазора между деталями; наличие прихваток.

Для проведения экспериментов каждый образец собирали следующим образом: начальную и

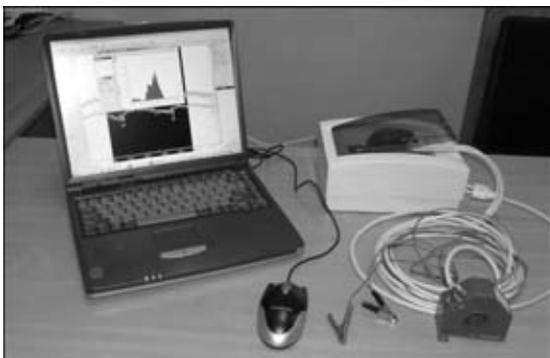


Рис. 1. Внешний вид информационно-измерительной системы



заключительную часть соединения выполнили качественно, а средняя имела соответствующий дефект. Схематические изображения экспериментальных образцов с искусственным введением возмущений и их фотографии приведены на рис. 3.

Анализ осциллограмм тока и напряжения при проведении предварительных экспериментов и оценка свойств используемого оборудования позволили сделать вывод, что наиболее информативным параметром является сварочный ток, так как источник питания имеет жесткую вольт-амперную характеристику, что делает сигнал напряжения неинформативным в связи с его незначительными колебаниями. Первичная обработка полученного сигнала (удаление с помощью цифрового фильтра помех) позволила увеличить его информативность.

После первичной обработки записанных данных осуществляли их разбивку на блоки, приблизительно кратные длине периода колебаний мгновенных значений сигнала сварочного тока, который объясняется капельным переносом электродного металла и определяется путем спектрального анализа выборки данных. Длина блока составила 1000 значений, соответствующих времени 0,1 с.

Таким образом, для каждого эксперимента получена матрица размером  $1000 \times N$ , где  $N$  — количество блоков, равное  $T/1000$  ( $T$  — общее количество записанных данных). После подсчета вы-

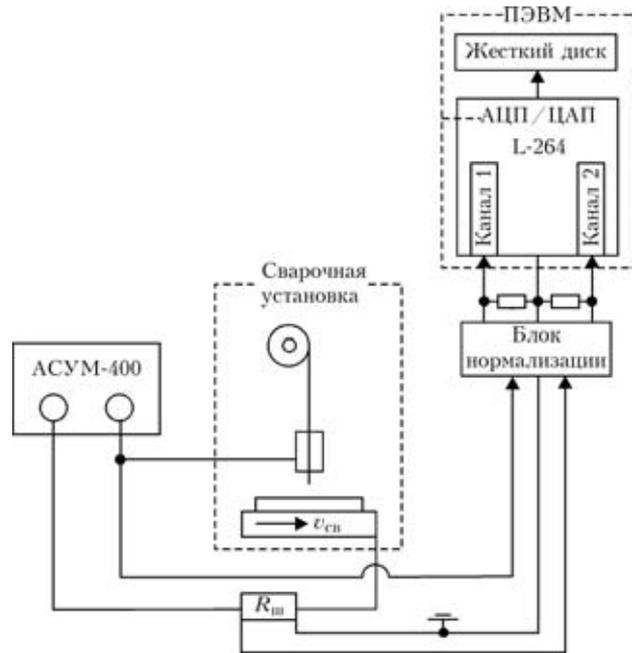


Рис. 2. Функциональная схема сварочной установки

борочных дисперсий для каждого блока был получен вектор размерностью  $1 \times N$ , который перераспределен таким образом, чтобы полученное множество этих значений соответствовало времени проведения сварки. Окончательная матрица имеет размерность  $10 \times (N/10)$ .

Внешний осмотр сварного шва и поперечных сечений вырезанных из него макрошлифов опре-

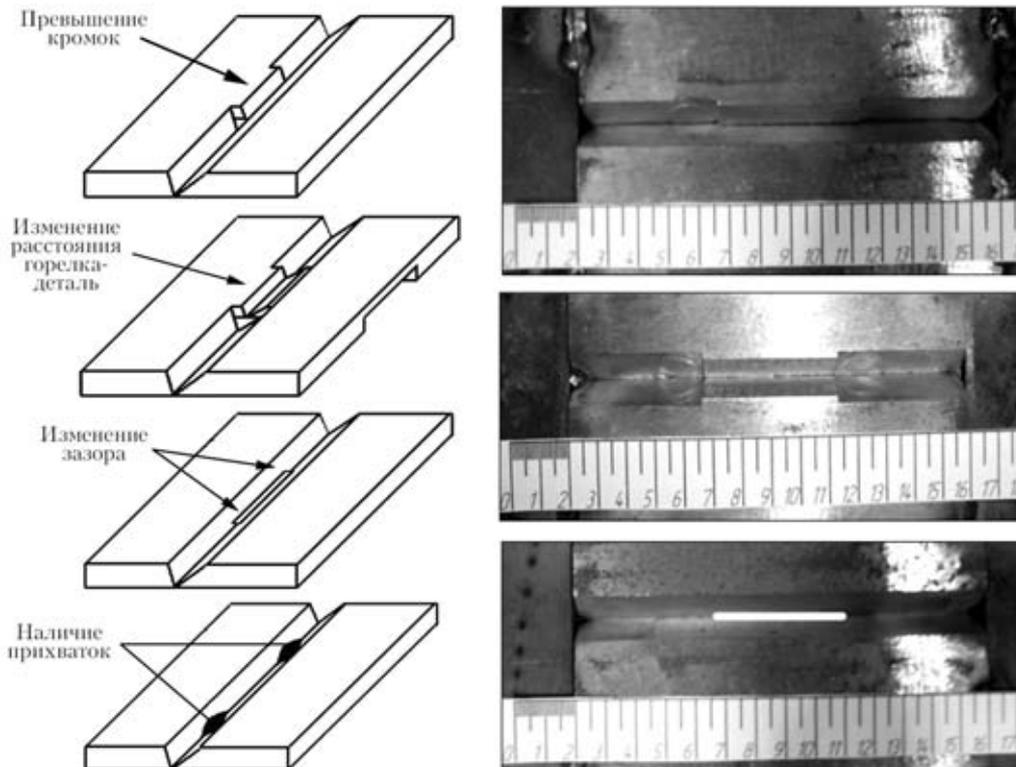


Рис. 3. Схематические изображения и фотографии экспериментальных образцов с искусственным введением возмущений



**Показатели погрешности нейронных сетей при идентификации дефектов**

Вид возмущения	Общее количество блоков	Ошибка работы сети, %	
		Карта Кохонена	LVQ
Превышение кромок	70	15,7	18,6
Изменение расстояния горелка–деталь	60	13,3	13,3
Наличие прихваток	60	16,6	50
Изменение зазора	60	21,6	83,3

делил качественные и некачественные участки для дальнейшего обучения нейронной сети.

Для кластеризации фрагментов осциллограмм параметров дуги использовали хорошо известные нейронные сети — карту Кохонена с упорядоченным расположением нейронов и сеть типа LVQ (Learning Vector Quantization — разделение обучающих векторов). Обе сети относятся к самоорганизующимся. Кластеризацию осуществляли по признаку отсутствия (класс 1) и наличия (класс 2).

Искусственная нейронная сеть для своей работы требует обучения [4], которое заключается в подаче на вход обучающей выборки данных — набора наблюдений, содержащего признаки исследуемого объекта. Одна из наиболее серьезных проблем при обучении сети заключается в том, что во многих случаях минимизируются не те помехи, которые требуется минимизировать. Это определяется как ограниченностью объема обучающей выборки, так и характером данных в ней. Однако увеличение объема обучающей выборки может привести к явлению переобучения и потере сетью важнейшего свойства — обобщения. В связи с этим проводили обязательную проверку на переобучение с помощью контрольной последовательности, не входящей в обучающую. При формировании обучающей и контрольной последовательностей дополнительно применяли алгоритмы, позволяющие выявлять и устранять ошибки измерений, вызванные различного рода помехами.

Для обоих типов применяемых сетей использовали одну и ту же учебную последовательность с 66 блоками. Матрица целей для сети LVQ имела

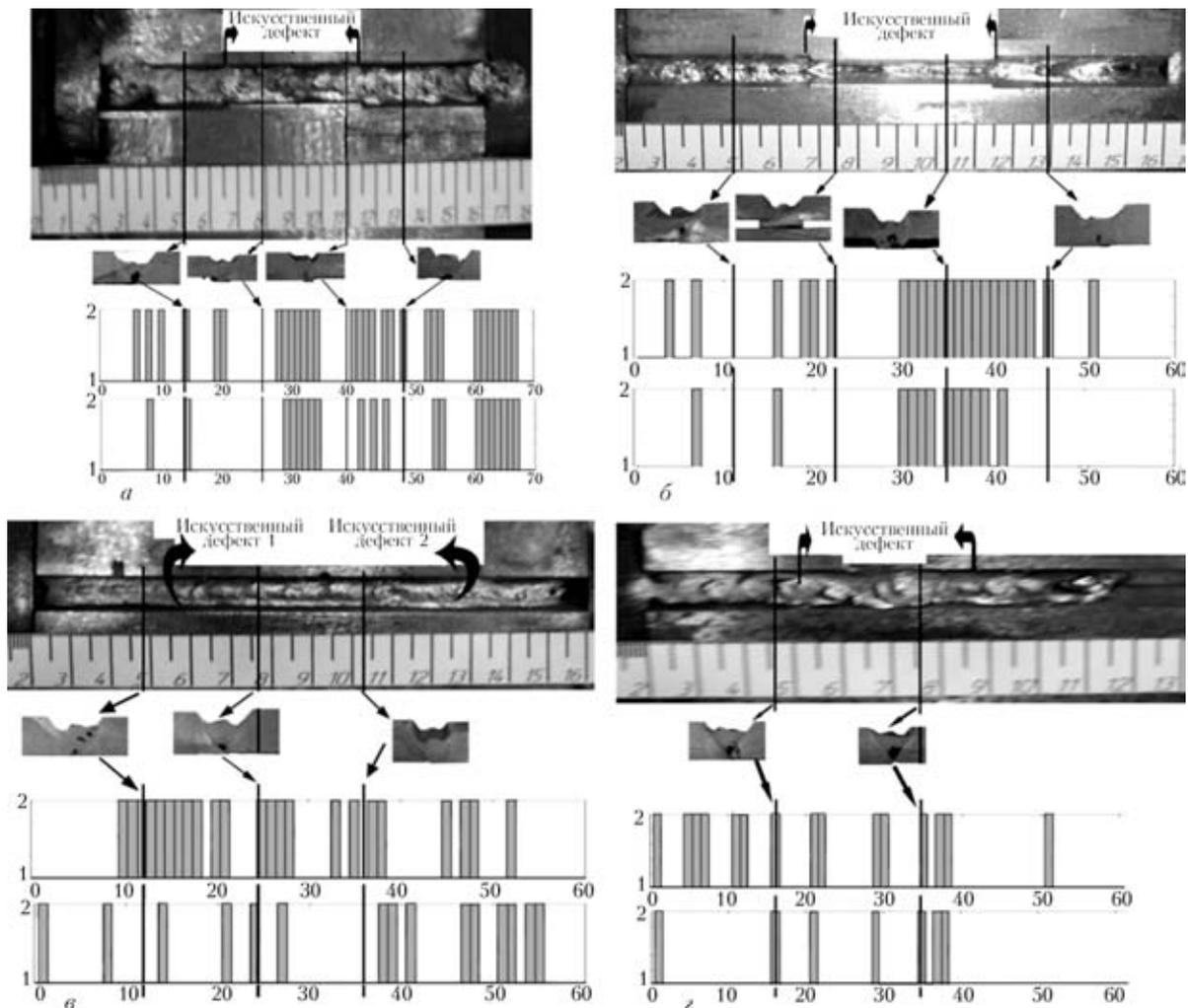


Рис. 4. Выявление в образцах дефектов, обусловленных превышением кромок (а), изменением расстояния горелка – деталь (б), наличием прихваток (е), изменением зазора (з)



размерность  $2 \times 66$ , поскольку классифицировалось только наличие дефекта. Значения для учебной последовательности выбирали из каждого эксперимента. Карта Кохонена имела два нейрона, сеть LVQ — десять нейронов в первом слое и два во втором. Количество нейронов первого слоя соответствует длине вектора входа, второго — количеству классов, на которые разделяется вектор входа. Обучение сети LVQ проводили на протяжении 2000 циклов с шагом 0,001.

Проверку нейронной сети для определения точности выявления дефектов осуществляли путем подачи на вход обученных нейронных сетей всей последовательности данных, записанных для каждого эксперимента. Ошибку работы сетей оценивали на последовательности, данные из которой не использовали при обучении. Оценки погрешности работы сетей сведены в таблице.

Результаты работы нейронных сетей по оценке качества исследуемых образцов приведены на рис. 4. Столбцы на диаграммах показывают наличие дефектов на соответствующих участках шва.

Анализ полученных данных показывает, что нейронные сети достаточно успешно выявляют три из четырех искусственно введенных дефектов сборки — превышение кромок (рис. 4, а), изменение расстояния между горелкой и изделием (рис. 4, б), наличие прихваток (рис. 4, в). Неточное выявление дефекта в начале его появления можно объяснить неизменностью электрических параметров в этот период времени, а также нестабильностью процесса на протяжении всего эксперимента. Погрешность выявления прихваток связана с инерционностью процесса саморегулирования дуги и их незначительным влиянием на электрические параметры дуги. Следует отметить факт выявления внутренних дефектов сварного шва (затекание шлака и несплавление кромок), что видно по фотографиям представленных сечений образцов. Наименее чувствительными нейронные сети оказались к ступенчатому изменению зазора между кромками (рис. 4, г).

Artificial neuron networks have been used to assess the quality of underwater welded joints with four types of fit-up defects: edge displacement, change in workpiece-torch distance, change in edge gap and presence of tack welds. The efficiency is shown of the application of neuron networks for the above types of defects, except for a change in the edge gap.

Проведенные исследования показали принципиальную возможность применения искусственных нейронных сетей для оценки качества сварного соединения при подводной мокрой сварке. Основным преимуществом данного метода является возможность дистанционного применения, т. е. размещение контрольной аппаратуры на палубе обеспечивающего судна. Повышение точности работы сетей вполне реально, но требует изучения особенностей физических процессов, происходящих в дуге при формировании разного рода дефектов. Перспективным представляется использование нейронных сетей с обратными связями для самосовершенствования систем мониторинга качества формирования шва.

## Выводы

1. Проведенная оценка показала принципиальную возможность применения искусственных нейронных сетей для мониторинга качества сварных соединений при мокрой подводной сварке. Они позволяют выявлять как дефекты сборки сварного соединения, так и внутренние дефекты сварных швов (затекание шлака и несплавление кромок), выполненных под водой.

2. Информативным параметром может служить сигнал сварочного тока. Полученные данные о сигналах нуждаются в предварительной обработке с целью устранения помех и увеличения информативности сигнала.

3. На основании полученной погрешности работы нейронных сетей для дальнейшей работы целесообразно использовать карты Кохонена.

1. *Intelligent control for the shape of the weld pool in pulsed GTAW with filler metal / D. B. Zhao, S. B. Chen, L. Wu et al. // Welding Res. — 2001. — № 11. — P. 253–260.*
2. *On-line quality monitoring in short-circuit metal arc welding / S. Adolfsson, A. Bahrami, G. Bolmsjo, I. Claesson // Ibid. — 1999. — № 2. — P. 59–72.*
3. Денисенко В., Халявко А. Защита от помех датчиков и соединительных проводов систем промышленной автоматизации // *Соврем. технологии автоматизации*. — 2001. — № 1. — С. 68–75.
4. Медведев В. С., Потемкин В. Г. Нейронные сети: Matlab 6. — М.: Диалог-Мифи, 2002. — 489 с.

Поступила в редакцию 19.05.05



## ОЦЕНКА ДЕФОРМИРУЕМОСТИ СВАРНЫХ СОСТАВНЫХ ЗАГОТОВОК, ПОЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ\*

Ч. Х. ЧЕНГ, Л. Ч. ЧАН, Т. Ч. ЛИ (Политехнический ун-т, Гонконг, Китай),  
Ч. Л. ЧОУ (Университет штата Мичиган, г. Диарборн, США)

Изучена деформируемость составных сварных заготовок (ССЗ) из стали, полученных с использованием лазерной сварки, в зависимости от сочетания толщин соединяемых элементов и расположения (ориентации) швов. Деформируемость заготовок оценивалась по Свифту. Показано, что более тонкостенная часть составных заготовок определяет их деформируемость.

*Ключевые слова:* лазерная сварка, составные сварные заготовки, нержавеющая сталь, направление сварки, сочетание толщин, деформируемость, предел деформируемости

Составные сварные заготовки (ССЗ) — это специальные заготовки, выполненные из нескольких тонких металлических листов различной толщины, формы, иногда прочности для последующего деформирования с целью получения сложной конфигурации. Их все чаще применяют в автомобилестроении, а также в таких отраслях промышленности, как электротехника, производство тары и упаковки, строительстве [1]. Поскольку заготовки обычно изготавливают специально для производства определенных деталей, их конструирование представляет собой новую задачу для отрасли, внедряющей эти заготовки в производство. Для анализа деформируемости стальных заготовок нашли применение различные виды испытаний. В работе [2] рассмотрены два типа разрушения ССЗ и показано, что прессуемость их связана с изменением режима деформации и зависит от прочности ССЗ. В работе [3] установлено, что при глубокой вытяжке в случае распределения деформации по большей толщине смещение линии шва увеличивается. В работе [4] показано, что деформируемость ССЗ снижается с повышением отношения толщины составляющих заготовки.

В настоящей работе рассмотрен высокопроизводительный процесс лазерной сварки стальных заготовок, полученных из элементов различной толщины, а также исследовано влияние направления сварки и комбинации толщин соединяемых элементов на деформируемость заготовок.

ССЗ из нержавеющей стали AISI 304 сваривали встык лазером Nd-YAG мощностью 2 кВт. Для

получения приблизительно 180 образцов использовали три стальных листа толщиной 1,0; 1,2 и 1,5 мм с различными направлениями сварки (0,45 и 90°) и с разными комбинациями толщин (1/1; 1/1,2; 1/1,5; 1,2/1,2; 1,2/1,5 и 1,5/1,5 мм). Для получения чистых кромок без заусенцев, загрязнений или масла кромки свариваемых образцов перед сваркой подвергали механической обработке и обезжириванию. С целью регулировки положения луча лазера и обеспечения точности сборки под сварку каждую пару образцов собирали на специальном приспособлении для сборки-сварки (рис. 1). В результате экспериментов установлены оптимальные параметры сварки ССЗ для каждой комбинации толщин (таблица). Из таблицы видно, что оптимальные результаты можно получить путем варьирования скоростью сварки и общей толщины основных свариваемых элементов ССЗ и использованием двусторонней сварки, при этом на более толстом материале необходимо применять более низкую скорость. Мощность лазера может быть практически постоянной, изменяющейся в узком диапазоне (1000...1100 Вт). Для всех сочетаний толщин свариваемых элементов луч лазера фокусировали на верхней поверхности образца по линии соединения или на более толстом из свариваемых материалов. Расход защитного газа, в качестве которого использовали аргон, составлял 20 л/мин. Целостность шва на поверхности

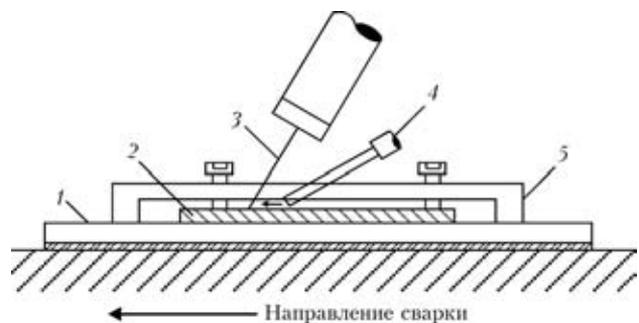


Рис. 1. Схема процесса лазерной сварки: 1 — оснастка для сборки сварки; 2 — свариваемый образец; 3 — лазерный луч; 4 — сопло для защитного газа; 5 — зажимное приспособление

\* По материалам Второй международной конференции «Laser Technologies in Welding and Materials Processing», 23–27 мая 2005 г., пос. Кацивели, Крым, Украина.

**Оптимальные параметры сварки ССЗ для различной комбинации толщин заготовок**

Комбинации толщин, мм	Мощность лазера, Вт	Скорость сварки, мм/с	Положение фокуса	Защитный газ, расход, л/мин
1/1	1100	27	Поверхность	Аргон, 20
1,2/1,2	1000	23		
1,5/1,5	1100	15		
1/1,2	1000	25	Поверхность более толстого основного металла	
1/1,5	1100	20		
1,2/1,5	1100	15		

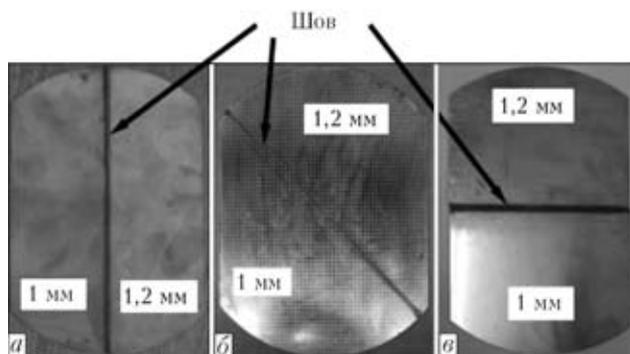


Рис. 2. ССЗ (диаметр заготовки 165,1 мм), полученные с различными углами сопряжения элементов: а — 0; б — 45; в — 90°



Рис. 3. Внешний вид лицевой поверхности шва на ССЗ, сваренной на оптимальных режимах

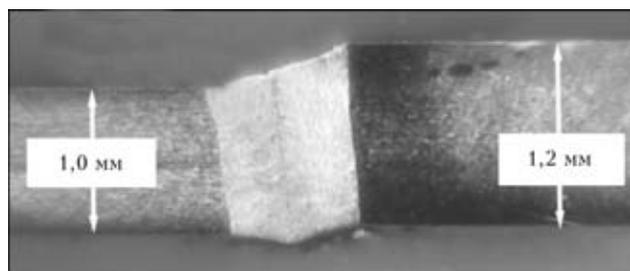


Рис. 4. Макрошлиф поперечного сечения ССЗ, сваренной на оптимальных режимах

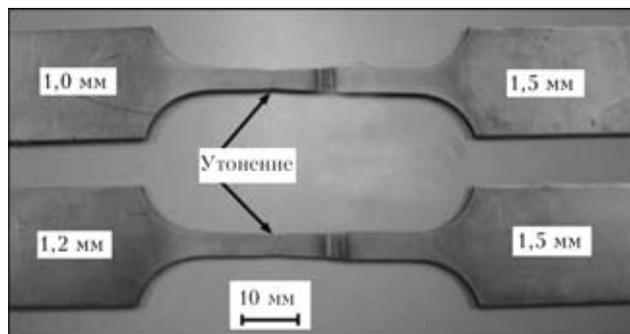


Рис. 5. Внешний вид образцов из ССЗ после испытаний на растяжение

и по сечению исследовали в соответствии с требованиями Британских стандартов EN ISO 13919-1 и 15614-11, общие механические свойства ТВБ определяли путем испытаний на растяжение.

Деформируемость полученных ССЗ исследовали с помощью испытаний по Свифту. Для максимальных и минимальных деформаций, измеренных на образцах ССЗ различной ширины, строили диаграммы предела формовки (ДФФ). Исследовали деформируемость и типы разрушений ССЗ, а также анализировали влияние направления сварки и отношения толщины свариваемых элементов. Несмотря на различные направления сварки почти все швы находились в центре ССЗ (рис. 2). Исследования проводили с использованием установки с полусферическим пуансоном диаметром 50 мм. Пластическое течение материала контролировали при приложении усилия 100 кН. Для компенсации различий в толщине при испытаниях в каждой заготовке ССЗ использовали специально спроектированные прокладки.

Поверхность и профиль шва в поперечном сечении на заготовке ССЗ (отношение толщин 1,2/1,5 мм), сваренной на оптимальных параметрах, приведены соответственно на рис. 3 и 4. Видно, что поверхность шва хорошо сформирована по всей длине ССЗ, трещины и поры отсутствуют. Профиль шва удовлетворительный, несплавления, подрезы и провисания не наблюдаются. Свойства при растяжении ССЗ из элементов различной толщины, содержащих поперечные швы, оценивали на образцах малого размера, вырезанных из ССЗ. Испытания на растяжение проводили при постоянной скорости траверсы 1 м/мин, до образования местного сужения в сечении образца. Как видно из рис. 5, разрушение в основном происходит не в шве или металле ЗТВ, а в основном металле, что подтверждает тот факт, что данные параметры сварки обеспечивают получение приемлемых швов и, следовательно, качественных ССЗ. На рис. 6 приведены кривые напряжение–деформация, построенные для ССЗ. Кривые 1–3

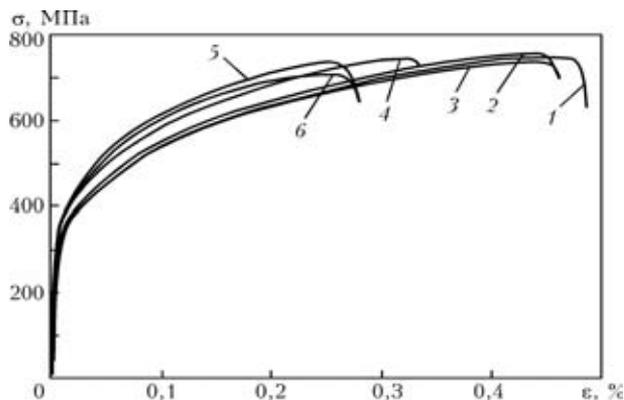


Рис. 6. Характерные диаграммы растяжения, построенные для образцов из ССЗ, содержащих элементы различной толщины: 1 — 1,5/1,5; 2 — 1,2/1,2; 3 — 1,0/1,0; 4 — 1,0/1,2; 5 — 1,0/1,5; 6 — 1,2/1,5 мм

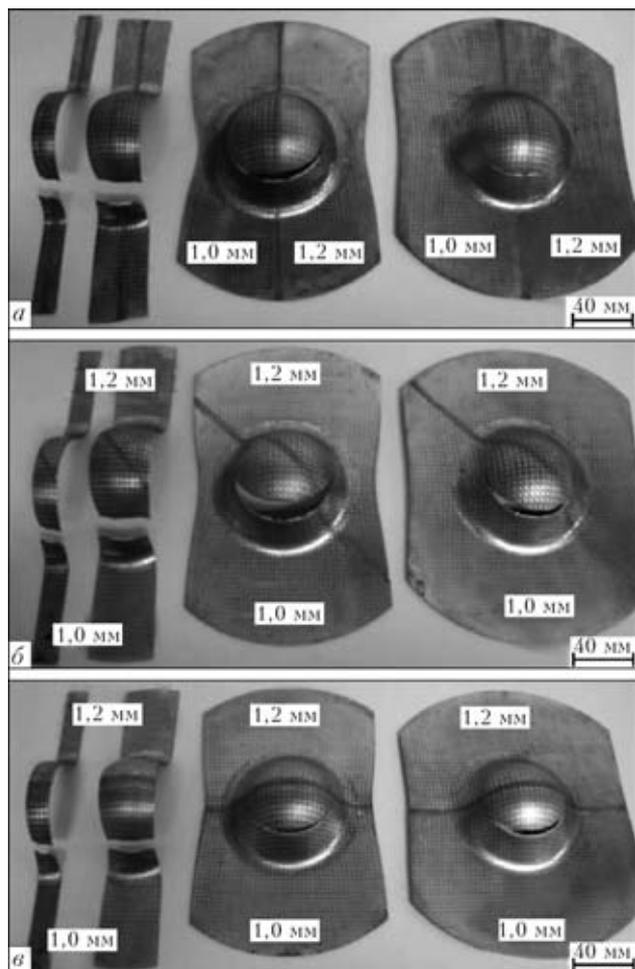


Рис. 7. Деформированные элементы из ССЗ (1,0 + 1,2 мм), полученные сваркой в различных направлениях с углами сопряжения: а — 0; б — 45; в — 90°

показывают, что в ССЗ, состоящих из элементов одинаковой толщины, значения напряжений и деформаций подобны соответствующим значениям для основного металла. Однако в ССЗ, состоящих из элементов различной толщины, значения деформации тем ниже, чем больше различие по толщине (рис. 6, кривые 4–6). Это обусловлено тем фактом, что деформирование ССЗ происходит преимущественно в более тонком основном металле (см. рис. 5).

Как видно из рис. 7, направление сварки не оказывает влияния на участок разрушения, все разрушения распространяются в направлении, перпендикулярном направлению приложения основной нагрузки. Разрушения в ССЗ с направлениями сварки 45 и 90° (рис. 7, б, в) наблюдаются в более тонком элементе основного металла на определенном расстоянии от шва, в то время как в ССЗ с направлением сварки 0° разрушение зарождалось в шве (рис. 7, а). Таким образом, можно утверждать, что качественные швы, полученные в различных направлениях, оказывают незначительное влияние на деформируемость и тип разрушения в ССЗ, поскольку разрушение в основном происходит в более тонком из свариваемых

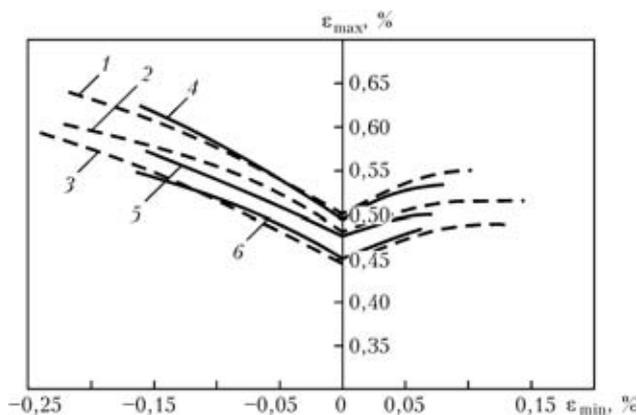


Рис. 8. ДПФ, построенные для ССЗ из нержавеющей стали (направление сварки 90°), состоящих из элементов одинаковой толщины: 1 — 1,5; 2 — 1,2; 3 — 1,0; 4 — 1,5/1,5; 5 — 1,2/1,2; 6 — 1,0/1,0 мм

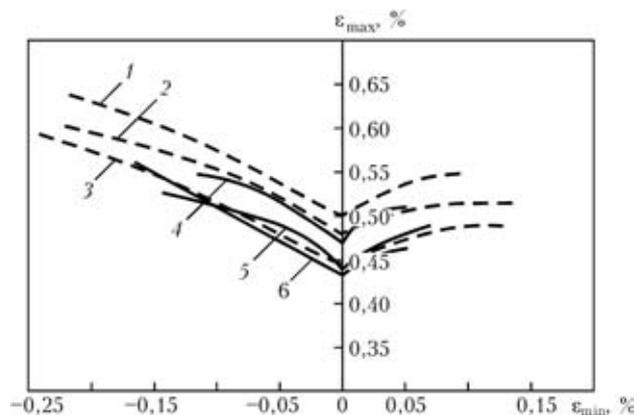


Рис. 9. ДПФ, построенные для ССЗ из нержавеющей стали (направление сварки 90°), состоящих из элементов различной толщины: 1 — 1,5; 2 — 1,2; 3 — 1,0; 4 — 1,2/1,5; 5 — 1,0/1,2; 6 — 1,0/1,5 мм

элементов в направлении, перпендикулярном направлению приложения основной нагрузки.

С помощью нанесения круговых сеток на поверхность ССЗ измеряли максимальные и минимальные деформации и строили диаграммы ДПФ. На рис. 8 и 9 показаны диаграммы, построенные для ССЗ (направление сварки 90°), состоящих из элементов одинаковой и различной толщины. Сравнение данных диаграмм с диаграммами, построенными для основного металла (штриховые кривые), показывает, что ССЗ, состоящие из элементов одинаковой толщины, также деформируются как основной металл. Это подтверждает тот факт, что швы, полученные в направлении 90° к направлению приложения основной нагрузки, оказывают незначительное влияние на деформируемость ССЗ, состоящих из элементов одинаковой толщины. Как видно из рис. 7, в, ССЗ, состоящие из элементов различной толщины, разрушались в основном в более тонком из свариваемых элементов, что соответствует ДПФ, построенным для более тонких элементов ССЗ.

В заключение следует отметить, что в работе исследовали заготовки ССЗ из нержавеющей стали AISI 304, состоящие из элементов с различ-

ными сочетаниями толщины, сваренных в различных направлениях с использованием лазера Nd-YAG мощностью 2 кВт. Оптимальные параметры сварки для комбинаций элементов различной толщины определены с обеспечением хорошего формирования швов и учета свойств ССЗ при испытаниях на растяжение. В случае обеспечения качественного шва разрушение обычно наблюдалось в более тонком из свариваемых элементов ССЗ (в соответствии с диаграммами ДПФ, построенными для более тонкого элемента основного металла). Следует отметить, что только на основании ДПФ нельзя получить достоверные данные о предельных деформациях для ССЗ, состоящих из комбинаций элементов различной толщины.

Настоящая работа выполнена благодаря частичному финансированию по грантам, выделен-

ным соответствующим Научно-исследовательским советом, ответственным за распределение грантов в Особом административном регионе Гонконга, Китай (проект PolyU 5178/01E), а также Научным комитетом политехнического университета Гонконга (проект G-T906).

1. *Pallett R. J., Lark R. J.* The use of tailored blanks in the manufacture of construction components // *J. Mater. Proc. Techn.* — 2001. — **117**. — P. 249–254.
2. *Saunders F. I., Wagoner R. H.* Forming of tailor-welded blanks // *Metallurgical and Materials Transactions A.* — 1996. — **27A**. — P. 2605–2615.
3. *Characteristics of weld line movements for the deep drawing with drawbeads of tailor-welded blanks* / Y. Heo, Y. Choi, H. Y. Kim, D. Seo // *J. Mater. Proc. Techn.* — 2001. — **111**. — P. 164–169.
4. *Chan S. M., Chan L. C., Lee T. C.* Tailor-welded blanks of different thickness ratios effects on forming limit diagrams // *Ibid.* — 2003. — **132**. — P. 95–101.

Deformability of tailored welded blanks (TWB) from steel produced by laser welding was studied, depending on a combination of thicknesses of the joined elements and location (orientation) of the welds. Deformability of the blanks was evaluated by Swift method. It is shown that a thinner part of the blanks determines the deformability of the tailored blanks.

Поступила в редакцию 26.01.06

## МОБИЛЬНАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ

*В ИЭС им. Е. О. Патона разработана мобильная система регистрации параметров сварочных режимов БРПС-1.*

*В систему входит:*

- измерительный блок для преобразования сигналов с датчиков технологических параметров в цифровой код и передачи данных в ПЭВМ;
- портативный персональный компьютер (ноутбук) с программным обеспечением ПЭВМ для отображения значений параметров сварочных режимов на мониторе, записи их на «жесткий» диск и формирования протокола процесса.

*Система позволяет подключаться к имеющемуся оборудованию и записывать параметры режимов в реальном масштабе времени с последующим выводом на печать. Запись режимов может храниться как в печатном, так и электронном виде. Последнее необходимо для паспортизации процесса изготовления деталей с применением сварки и наплавки.*

*Система предназначена для регистрации значений основных параметров сварочного процесса в реальных единицах измерения.*

### Контакты:

03680, Украина, Киев-150,  
ул. Боженко, 11  
Институт электросварки  
им. Е. О. Патона НАН Украины,  
отд. № 23  
Тел./факс: (38044) 287 61 57  
E-mail: zhudra@intom.com.ua





## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНОЙ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В СРЕДЕ ЗАЩИТНОГО ГАЗА\*

С. ТОМИ, Т. ЗЕФЕЛД (Бремен. ин-т прикладной лучевой технологии, Германия)

При использовании гибридной лазерно-дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа особое значение приобретает понимание особенностей взаимодействия двух процессов — лазерной и дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа, которые существенно влияют на процесс гибридной сварки. Необходимым условием для эффективного и рационального применения в промышленности этого способа сварки является тщательный учет требований к изготавливаемым изделиям в конкретных областях применения и промышленной среде. Рассмотрено использование гибридной сварки при изготовлении труб и алюминиевых прессованных профилей.

*Ключевые слова:* гибридная лазерно-дуговая сварка, плавящийся электрод, защитный газ, трубы из нержавеющей стали, железнодорожные конструкции из алюминия, волоконный лазер

Разработка и применение новейших способов сварки таких, как гибридный процесс (далее гибридная сварка) вызваны необходимостью уменьшения капиталовложений и текущих расходов, сокращения продолжительности цикла сварки и повышения качества продукции. Указанный способ сварки впервые был исследован в 1970-х годах. Он характеризуется сочетанием лазерной и дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа в одной общей рабочей зоне [1]. К преимуществам гибридной сварки можно отнести существенную стабилизацию процесса сварки, обеспечение более высокой по сравнению с дуговой сваркой скорости сварки и улучшение в некоторых случаях качества швов. Благодаря отмеченному расширяются области применения этого способа сварки, в частности, при сварке материалов большой толщины [2–5]. До недавнего времени для выполнения таких задач в основном использовали CO<sub>2</sub>-лазеры мощностью свыше 8 кВт.

Для сравнения, при сварке алюминиевых сплавов с толщиной листа, приемлемой для автомобильной промышленности, достаточно мощности, которую обеспечивают современные Nd:YAG-лазеры (с учетом некоторых ограничений, касающихся скорости сварки). Следовательно, благодаря простоте подведения луча (оптическое волокно вместо систем зеркал, как в случае CO<sub>2</sub>-лазеров) и некоторой специфике производства в этой области промышленности чаще всего используют

гибридную сварку с Nd:YAG-лазером [6]. Более того, при разработке серийных установок в настоящее время ориентируются на применение гибридной сварки с Nd:YAG-лазером. Однако использование такого процесса со сравнительно низкой мощностью лазера, как правило, имеет ограничения, связанные с толщиной свариваемого материала. Поэтому этот способ сварки не рекомендуется при изготовлении алюминиевых прессованных профилей для железнодорожных конструкций различной толщины. Возникает необходимость в использовании излучения большей мощности и с более простым подводом луча, что возможно в случае применения высокомошных волоконных лазеров.

**Взаимодействия между дугой и лазерным излучением при гибридной сварке.** Для того чтобы использовать все преимущества, получаемые при комбинации процессов дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа и лазерной сварки, следует оптимизировать различные параметры сварочного процесса. Поскольку такие параметры, как мощность лазера и сварочное напряжение, часто имеют значительное взаимное влияние, необходимо детально изучить механизм их взаимодействия. Наличие взаимодействия между лазерным и дуговым способами сварки плавящимся электродом в среде защитного газа становится очевидным благодаря скоростной видеосъемке. Зафиксировано, что при расположении оси дуги от лазера на расстоянии 9 мм никаких отклонений не происходило (рис. 1).

На первый взгляд, кажется неоправданным использование гибридной сварки при указанных условиях. С одной стороны, предполагается, что для данного пространственного положения дуги преимущества процесса сводятся к влиянию температурного поля, с другой — при расстоянии между дугой и лазером 3 мм, т. е. в условиях реального процесса гибридной сварки, ось дуги

\* По материалам Второй международной конференции «Laser Technologies in Welding and Materials Processing», 23–27 мая 2005 г., пос. Кацивели, Крым, Украина.

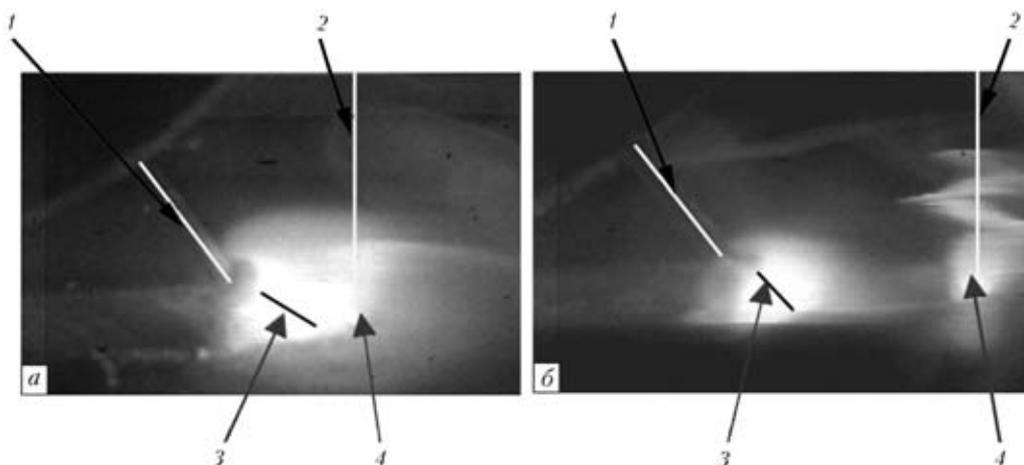


Рис. 1. Влияние лазерного луча на дугу при расстоянии между ними 5 (а) и 9 мм (б): 1 — присадочная проволока; 2 — лазерный луч; 3 — ось дуги; 4 — парогозовый канал

будет существенно отклоняться в сторону парогозового канала, при этом образуется общая рабочая плазма. Таким же образом можно проследить зависимость между мощностью лазера и дуги.

В качестве примера рассмотрим процесс гибридной сварки CO<sub>2</sub>-лазером стали, демонстрирующий взаимодействие между лазером и дуговой сваркой плавящимся электродом в среде защитного газа. В ходе экспериментов (мощность лазера  $P_{\text{л}} = 4...9$  кВт, скорость сварки  $v_{\text{св}} = 1,8$  м/мин, напряжение на дуге  $U_{\text{д}} = 19...30$  В, скорость подачи проволоки  $v_{\text{пр}} = 9$  м/мин, защитный газ аргон или гелий) установлено, что увеличение мощности дуги  $P_{\text{д}}$  так же, как и мощности лазера  $P_{\text{л}}$ , способствует снижению частоты короткого замыкания  $f_{\text{к.з}}$  и значительно влияет на процесс переноса металла (рис. 2).

**Применение гибридной сварки МИГ с CO<sub>2</sub>-лазером при производстве труб.** В современной производственной установке для продольной неп-

рерывной сварки труб трубопроводов из нержавеющей стали используют CO<sub>2</sub>-лазер мощностью 8 кВт. В Бременском институте прикладной лучевой технологии разработали, сконструировали и протестировали сварочную головку (рис. 3), которая может использоваться в обоих процессах сварки. При этом большое внимание уделено тепловым нагрузкам, возникающим под воздействием непрерывных сварочных циклов продолжительностью несколько часов. Эти нагрузки вызваны не только дугой, но и лазерной плазмой, а также обратным отражением лазерного луча от сварочной ванны.

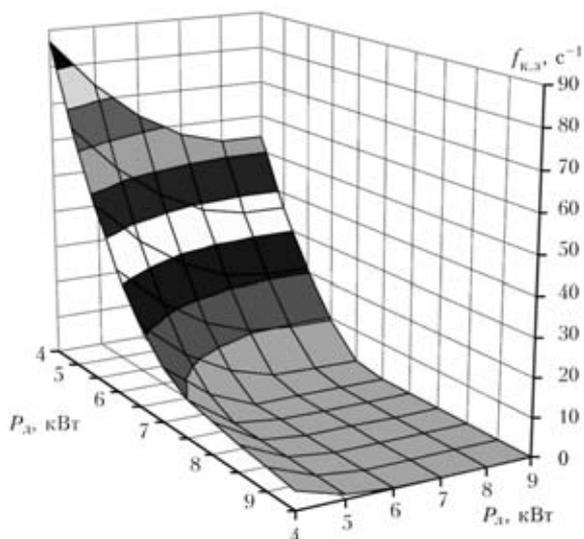


Рис. 2. Влияние мощности лазера  $P_{\text{л}}$  и мощности дуги  $P_{\text{д}}$  на частоту короткого замыкания  $f_{\text{к.з}}$

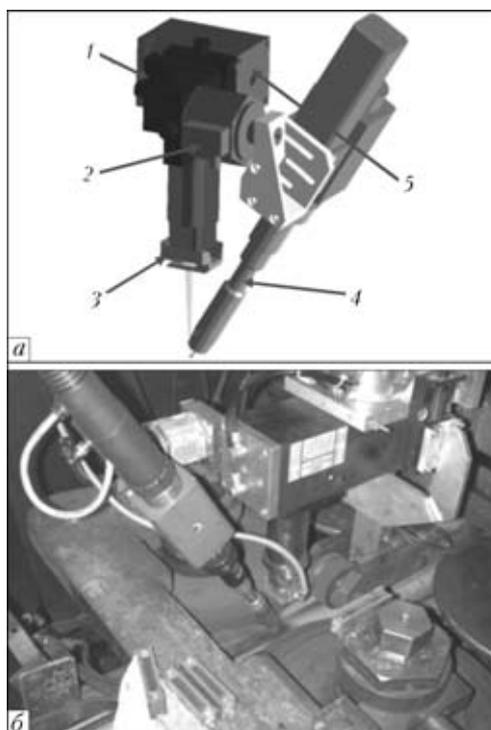


Рис. 3. Сварочная головка, используемая при гибридном процессе сварки CO<sub>2</sub>-лазером, в проектном (а) и промышленном (б) исполнении: 1 — блок регулировки; 2 — противоударная система; 3 — пересекающая струя; 4 — газовая горелка для дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа; 5 — фокусирующее зеркало

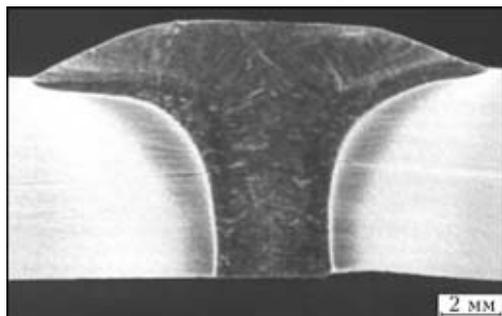


Рис. 4. Поперечные сечения сварного шва в стенке трубы (Ду 273×5 мм), полученного гибридной сваркой

В ходе производственных испытаний процесса изготовления трубопроводов (Ду 273×8 мм) из стали 12 % Сг–4,5 % Ni–1,5 % Мо сварку выполняли со скоростью 1,2 м/мин, мощность лазера составляла до 7 кВт, а мощность дуги — до 8 кВт. Такая скорость сварки по сравнению с обычной электродуговой сваркой может увеличить общую производительность процесса производства труб более чем на 300 %. Она обеспечивается не столько непосредственно сварочным процессом, сколько качеством формирования металла шва. Рентгеновская дефектоскопия показала 100%-е отсутствие в нем дефектов (трещин, пор и пр.). На рис. 4 представлено поперечное сечение сварного шва, выполненного гибридной сваркой в стенке трубы Ду 273×5 мм.

На основе изложенного выше становится очевидным, что, если процесс гибридной сварки осуществлять в производственных условиях с помощью оборудования, спроектированного для ду-

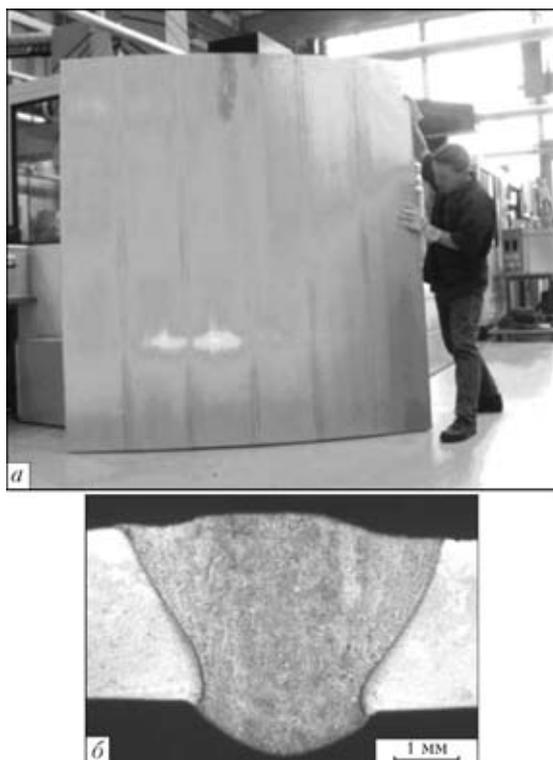


Рис. 5. Сегмент крыши поезда-экспресса (а) и поперечный разрез шва (б)

говой сварки, то скорость сварки не будет решающим фактором для уменьшения продолжительности сварочного цикла. Возможно, появятся другие критические параметры технологических операций, осуществляемых до и после сварки. Для этого потребуются дополнительные исследования.

**Применение гибридной сварки с использованием твердотельного лазера для изготовления железнодорожных конструкций.** Гибридная сварка Nd:YAG-лазером широко используется для изготовления алюминиевых прессованных профилей опытных панелей. Сегмент крыши поезда-экспресса (рис. 5) изготавливают из шести алюминиевых прессованных профилей длиной 2 м из сплава Al–Mg–0,7 % Si толщиной 3 мм с использованием присадочной проволоки Al–12 % Si. При этом специальные зажимные механизмы не применяются. При мощности лазера 4 кВт и мощности дуги импульсно-дуговой сварки 3,65 кВт скорость сварки составляла 4 м/мин.

Проведенные эксперименты показали целесообразность использования гибридной сварки Nd:YAG-лазером, особенно при заполнении зазора. В этом случае нет необходимости в специальной подготовке шва, использовании зажимных приспособлений или повышенной точности перемещения сварочной головки. Более того, по сравнению с обычной дуговой сваркой плавящимся электродом в среде защитного газа гибридная сварка Nd:YAG-лазером позволяет увеличить ско-

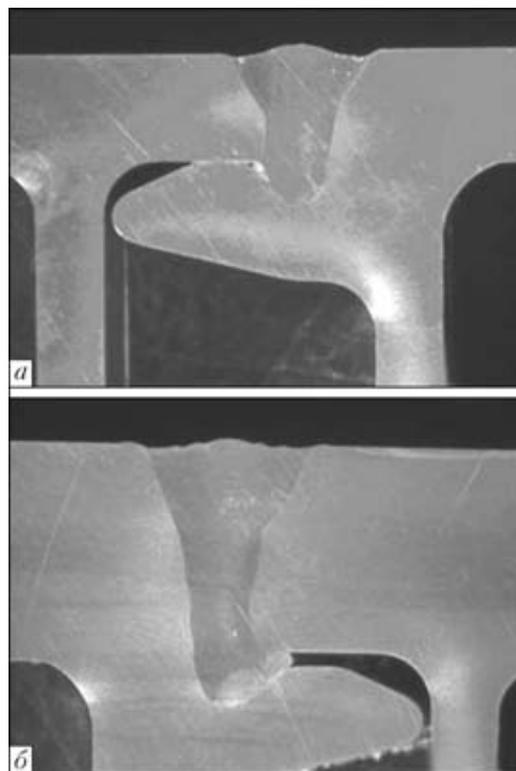


Рис. 6. Макрошлифы (×4) соединений сплава EN-AW 6008 толщиной 4 (а) и 8 мм (б), выполненных гибридной лазерно-дуговой сваркой плавящимся электродом в среде защитного газа с применением волоконного лазера





# МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВО-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКОЙ

Т. М. ЛАБУР, д-р техн. наук, А. А. ГРИНЮК, инж., А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, канд. техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проведен сравнительный анализ механических соединений высокопрочных алюминиевых сплавов 1420 и 1460, полученных плазменной и аргодуговой сваркой разнополярным асимметричным током неплавящимся электродом с использованием серийных сварочных проволок СвАМг63 и Св1201. Показано, что прочность и вязкость разрушения швов при внецентренном растяжении образцов существенно зависят от теплофизических условий сварки.

*Ключевые слова:* плазменная сварка, алюминий-литиевые сплавы, сварные соединения, металл шва, механические свойства

Создание изделий аэрокосмической техники новых модификаций с более эффективными тактико-техническими и экономическими параметрами выдвигает повышенные требования к свойствам материалов и их сварных соединений. Использование в таких изделиях нового класса алюминиевых сплавов систем легирования Al-Mg-Li (сплав 1420) и Al-Cu-Li (сплав 1460) позволяет уменьшить массу конструкций на 8...15 % благодаря высокой удельной прочности и повышенному модулю упругости. Особенностью сплавов является многокомпонентный состав и наличие включений упрочняющих фаз, расположенных параллельно направлению прокатки. В условиях технологических нагревов, включая и сварочные процессы, сплавы проявляют склонность к охрупчиванию [1, 2].

Наиболее технологичными и часто используемыми способами получения неразъемных соединений алюминий-литиевых сплавов являются дуговые способы сварки. Широкое использование неплавящегося электрода обеспечивает более высокую плотность металла шва по сравнению со сваркой плавящимся электродом, который отличается большей производительностью. Традиционные способы сварки переменным синусоидальным током характеризуются относительно низкой проплавающей способностью. Использование разнополярного асимметричного тока с прямоугольной формой волны и низкочастотной модуляции вызывает периодическое углубление сварочной ванны, облегчая при этом дегазацию металла и уменьшая количество пор и включений оксидной пленки в металле шва.

Использование гелия в качестве защитного газа при сварке неплавящимся электродом на постоян-

ном токе прямой полярности способствует повышению тепловой мощности дуги, что приводит к увеличению глубины проплавления и повышению скорости сварки. Для реализации процесса требуется большая точность подготовки и сборки деталей, а также сложное оборудование для его управления. Кроме того, гелий повышает себестоимость технологических операций.

Для увеличения скорости сварки, обеспечения качества швов и уменьшения деформаций необходимо использование концентрированных источников нагрева. Одним из них может быть сжатая дуга, которая «обжимается» потоком газа, продуваемым через специальное сопло. Процесс плазменной сварки является дальнейшим развитием способа сварки неплавящимся электродом. Инертный газ, подаваемый через сопло небольшого отверстия, обжимает электрическую дугу, горящую между вольфрамовым электродом и изделием.

В сварных соединениях, полученных различными способами дуговой (плавящимся и неплавящимся электродом) и электронно-лучевой сварки, наблюдается образование неоднородной структуры и разупрочнение металла в ЗТВ [3], обусловленное перегревом металла во время термического цикла сварки. Последний приводит к развитию неоднородности в сварном соединении по содержанию легирующих элементов и примесей вследствие их сегрегации вдоль границ зерен, образования хрупких межзеренных прослоек из пересыщенных фаз, особенно на границе сплавления, где прослойки формируют плотный каркас вокруг зерен. Связанное с этим повышение концентрации напряжений облегчает зарождение трещины путем растрескивания фаз или нарушения контакта с матрицей, что снижает показатели прочности и вязкости сварных соединений литий-содержащих сплавов и надежность эксплуатации сварных конструкций в целом. В связи с этим целесообразно оценить механические свойства

сварных соединений алюминий-литиевых сплавов, выполненных плазменной сваркой, и сопоставить их с результатами, полученными при обычной аргонодуговой сварке неплавящимся электродом.

**Методика экспериментов.** Плазменную сварку на подкладке с формирующей канавкой сплавов 1420 и 1460 толщиной 4 и 3 мм выполняли разнополярным асимметричным током с прямоугольной формой волны. Плазматрон перемещали сварочной головкой АСТВ-2М со скоростью 36 м/ч. Для увеличения стойкости вольфрамового электрода плазматрона сварку выполняли с обеспечением большей протяженности протекания тока прямой полярности. Длительность прохождения тока обратной полярности выбирали минимально допустимой для эффективного катодного разрушения оксидной пленки. Соотношение между временем протекания тока при прямой и обратной полярности составило 3:1. Эксперименты выполняли с использованием комплекса для плазменной сварки на основе оборудования фирмы «Фрониус» (Австрия), в состав которого входят источник питания РТ 450-02 WZ, механизм подачи присадочной проволоки KD 4000, плазматрон РМВ 350 и система управления процессом сварки FPA 2003. Источник питания позволяет регулировать сварочный ток в широком диапазоне 10...450 А с частотой изменения полярностей 40...240 Гц. Частота разнополярного тока составляла 100 Гц. Плазматрон РМВ 350 обеспечивал стабильное формирование высокотемпературной плазменной струи. Диаметр плазмообразующего сопла выбирали минимальным (3,2 мм), исходя из условия предотвращения двойного дугообразования. Диаметр канала сопла при этом рассчитывали по формуле  $d_c \geq 1 + 0,01I_{св}$ , где  $d_c$  — диаметр сопла, мм,  $I_{св}$  — сила сварочного тока, А.

Аргонодуговую сварку разнополярным асимметричным током с прямоугольной формой волны тока выполняли с помощью источника питания MW 450 фирмы «Фрониус» (Австрия) и сварочной головки АСТВ-2М, скорость перемещения горелки 12...14 м/ч. Режимы плазменной и аргонодуговой сварки приведены в табл. 1.

В качестве присадочного материала использовали сварочные проволоки СвАМг63 и Св1201 диаметром 1,6 мм. Алюминиевые листы и присадочные проволоки перед сваркой подвергали химическому травлению, а торцы листов дополнительной механической зачистке на глубину не менее 0,1 мм.

Было изучено влияние различных способов сварки высокопрочных алюминий-литиевых сплавов 1420 и 1460 на физико-механические свойства металла швов, включая прочность, твердость и показатели вязкости разрушения. Испытания проводили при одноосном и внецентренном

растяжении [4]. Для испытания в условиях одноосного растяжения использовали плоские стандартные образцы, а при внецентренном — образцы размером 36×57 мм, толщиной 3 мм и острым надрезом глубиной 11 мм с радиусом 0,1 мм в его вершине. Скорость растяжения при испытании образцов сварных соединений составляла 2 мм/мин ( $3,3 \cdot 10^{-5}$  м/с). В процессе испытаний на осциллографе записывали диаграмму нагрузка – деформация, которая фиксировала важные с практической точки зрения моменты зарождения и развития трещины в исследуемом образце до полного разрушения. Диаграмма позволяет количественно оценить не только интенсивность напряжений в процессе деформации образца при внецентренном растяжении, но и определить протяженность стадии стабильного течения металла и работу, которую он затрачивает на отдельных этапах развития трещины, образующейся при разрушении сварного соединения. Условия испытания при внецентренном растяжении отвечали техническим требованиям ГОСТ 25.506. Экспериментальные результаты получены при испытании пяти образцов с использованием универсальной машины РУ-5 и расчета исходных данных.

По результатам испытания в условиях внецентренного растяжения определяли значения номинального напряжения  $\sigma_p$  и критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_c$ , а также удельной работы зарождения  $J_c$  и распространения (УРРТ) трещины [4, 5]. Значения показателя  $J_c$  оценивали путем расчета функции изменения энергии деформации в зависимости от длины трещины, используя соотношение Меркли – Кортена [5].

Результаты анализа сравнивали с данными о характере изменения рельефа излома, который получали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) JSM-840 с системой микроанализаторов Analitik Link — 860 /500 Obtek (при усредненном напряжении 15, 20, 30 кВ). Такой комплексный подход позволил выявить структурные особенности формирования швов при плазменной и аргонодуговой сварке неплавящимся электродом.

**Т а б л и ц а 1.** Режимы плазменной и аргонодуговой сварки алюминий-литиевых сплавов разнополярным асимметричным током

Марка сплава	$v_{св}$ , м/ч	$I_{св}$ , А	$Q_{пл}$ , л/мин	$v_{пр}$ , м/ч
<i>Аргонодуговая сварка</i>				
1460	14	200	—	82
1420	12	200	—	75
<i>Плазменная сварка</i>				
1460	36	180	0,1	123
1420	36	200	0,2	142

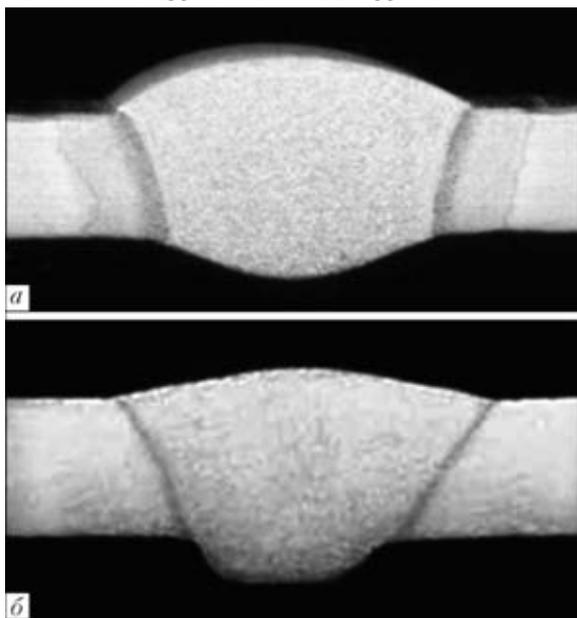


Рис. 1. Поперечные макрошлифы соединений сплава 1460 толщиной 3 мм, выполненных плазменной (а) и аргонодуговой (б) сваркой неплавящимся электродом с присадкой проволоки Св1201: а —  $v_{св} = 36$ ; б — 14 м/ч

**Результаты и их обсуждение.** Высокая удельная мощность плазменного потока и уровень температуры на участке металла, где действует активное пятно нагрева, способствуют увеличению проплавления способности сжатой дуги и величины ее заглупления в расплав сварочной ванны, что позволяет повысить скорость процесса по сравнению с обычной аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом в 2...3 раза при одинаковых значениях тока (рис. 1). Меньший тепловой вклад в основной металл приводит к некоторому сокращению протяженности ЗТВ и уменьшению степени разупрочнения сварного соединения (рис. 2). Однако в условиях одноосного растяжения прочность сварных соединений и металла швов, полученных как аргонодуговой, так и плазменной сваркой, находятся практически на одном уровне (табл. 2).

При внецентренном растяжении сварных соединений показатели прочности и вязкости разрушения швов существенно зависят от способа сварки (табл. 3). Различные тепловые условия нагрева и скорости охлаждения металла, сопровождающие процесс формирования сварных соединений, приводят к изменению показателей прочности, пластичности и вязкости разрушения швов. Разрушающее напряжение  $\sigma_p$  в металле швов, полученных при аргонодуговой сварке сплава 1420, составляет 289...320 МПа, а сплава 1460 —

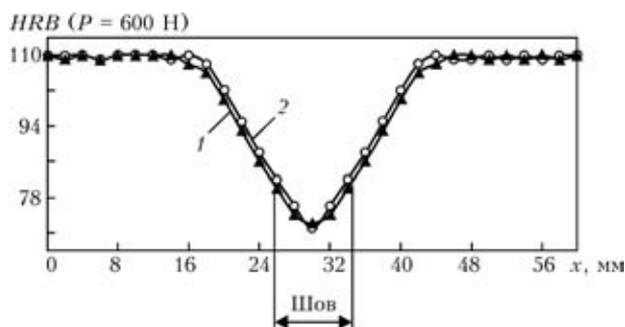


Рис. 2. Твердость сварных соединений сплава 1460 ( $\delta = 3$  мм), полученных аргонодуговой (1) и плазменной (2) сваркой с использованием присадки Св1201 на подкладке с формирующей канавкой

278...306 МПа (табл. 3). Значения  $K_c$  для швов сплава 1420 равны 23...25, а для сплава 1460 — 25...27 МПа $\sqrt{м}$ . Меньшие по сравнению со сплавом 1420 значения  $\sigma_p$  обусловлены, возможно, способностью меди, входящей в его состав, снижать стабильность состава пересыщенных твердых растворов и вызывать более интенсивный их распад при технологических нагревах, включая сварочные [6, 7]. Швы сплава 1460 при этом характеризуются более высокими значениями энергии зарождения трещины:  $J_c$  — 5,8...7,2 и УРРТ — 5,3...6,1 Дж/см<sup>2</sup>.

Использование концентрированного источника тепла при плазменной сварке обеспечивает более высокие значения показателя  $\sigma_p$ . Его значение у швов сплава 1420 возрастает до 379...428,

Таблица 2. Механические свойства сварных соединений алюминиево-литиевых сплавов при одноосном растяжении, полученных при различных способах сварки

Марка сплава (толщина образца, мм)	Способ сварки	Марка присадки	$\sigma_{св}$ , МПа	$\sigma_{св}^{м.ш}$ , МПа
1420 ( $\delta = 4$ )	Аргонодуговая	СвАМг63	328	322
	Плазменная		330	316
1460 ( $\delta = 3$ )	Аргонодуговая	Св1201	308	252
	Плазменная		302	261

Таблица 3. Показатели прочности, вязкости разрушения и ударной вязкости сварных соединений алюминиево-литиевых сплавов 1420 и 1460 при внецентренном растяжении

Марка сплава	Марка присадки	$\sigma_p$ , МПа	$K_c$ , МПа $\sqrt{м}$	$J_c$	УРРТ	KCV
				Дж/см <sup>2</sup>		
<i>Аргонодуговая сварка</i>						
1420	СвАМг63	$\frac{289...320}{304}$	$\frac{23...25}{24}$	$\frac{3,5...5,8}{4,4}$	$\frac{4,5...5,7}{4,9}$	$\frac{3,5...5,3}{4,9}$
1460	Св1201	$\frac{278...306}{293}$	$\frac{25...27}{26}$	$\frac{5,8...7,2}{6,5}$	$\frac{5,3...6,1}{5,7}$	$\frac{6,7...7,1}{7,2}$
<i>Плазменная сварка</i>						
1420	СвАМг63	$\frac{379...428}{401}$	$\frac{25...35}{30}$	$\frac{6,3...10,2}{7,4}$	$\frac{5,3...7,5}{6,4}$	$\frac{4,4...7,9}{5,9}$
1460	Св1201	$\frac{383...420}{403}$	$\frac{31...36}{35}$	$\frac{8,4...9,3}{8,8}$	$\frac{7,0...8,1}{7,5}$	$\frac{8,6...10,4}{9,5}$

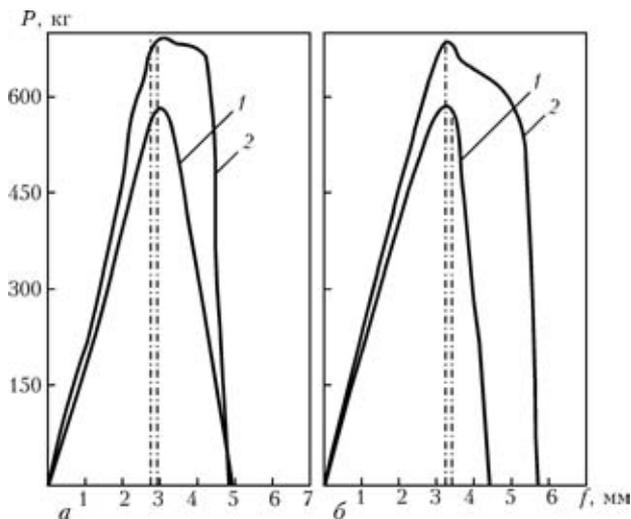


Рис. 3. Диаграммы нагрузка – перемещение  $P-f$  при испытании в условиях внецентренного растяжения образцов сварных соединений сплавов 1420 (а) и 1460 (б), полученных аргонодуговой (1) и плазменной (2) сваркой

а у швов сплава 1460 — до 383...420 МПа. Показатель  $K_c$  для швов из сплава 1420 повышается до 25...35, 1460 — до 31...36 МПа $\sqrt{м}$ . При этом швы сплава 1420 характеризуются значениями  $J_c = 7,4$  Дж/см $^2$ , что почти в 2 раза выше, чем при аргонодуговой сварке. Значения УРРТ и  $KCV$  также повышаются не меньше чем на 30...50 % при использовании плазменной сварки (рис. 3), чему способствует образование мелкокристаллической структуры швов. Толщина слоя кристаллов и межзеренных промежутков в 1,5 раза меньше в швах, полученных плазменной сваркой. Более высокие мощность источника нагрева и скорость перемещения плазматрона изменяют характер кристаллизации металла шва и способствуют получению его субдендритной структуры.

Таким образом, более качественные характеристики вязкости разрушения сварных соединений алюминийно-литиевых сплавов 1420 и 1460 обеспечиваются при использовании способов сварки, характеризующихся минимальной погонной энергией. Последняя способствует формированию металла шва более высокого качества с ограниченной степенью разупрочнения металла в ЗТВ и пониженной склонностью алюминийно-литиевых сплавов к охрупчиванию. Более высокое сопротивление разрушению металла шва обеспечивает высокий уровень работоспособности и надежности сварных соединений в конструкциях.

Comparative analysis has been performed on mechanical joints in high-strength aluminium alloys 1420 and 1460, produced by plasma and argon-arc welding using consumable electrode and standard welding wires SvAMg63 and Sv1201 at alternating-polarity asymmetric current. It is shown that strength and fracture toughness of the welds in off-centre tension of specimens strongly depend upon the thermal-physical welding parameters.

В заключение можно отметить, что концентрация энергии и высокая температура активного пятна нагрева плазменной струи способствуют увеличению глубины проплавления швов, что позволяет повысить скорость плазменной сварки в 2...3 раза по сравнению с обычной аргонодуговой. Высокие значения удельной мощности сжатой дуги и скорость сварки обеспечивают сокращение протяженности ЗТВ дуги и уменьшение степени разупрочнения сварных соединений.

Уровень прочности сварных соединений и металла шва, полученных аргонодуговой и плазменной сваркой, в условиях одноосного растяжения идентичны. При испытании на внецентренное растяжение, когда на образец одновременно действует растяжение и изгиб, номинальное разрушающее напряжение увеличивается на 30...35 % только в случае выполнения плазменной сварки.

Установлены значения показателей сопротивления разрушению ( $\sigma_p$ ,  $K_c$ ,  $KCV$ ) сварных соединений алюминийно-литиевых сплавов, полученных плазменной сваркой разнополярным асимметричным током с прямоугольной формой волны. Повышение прочности и вязкости разрушения швов при внецентренном растяжении в сварных соединениях, полученных плазменной сваркой убедительно показывает, что применение этого способа в неразъемных соединениях может обеспечить необходимые работоспособность и надежность конструкций из этих сплавов.

1. Козут Н. С., Лабура Т. М., Ищенко А. Я. Тріщиностійкість високоміцних алюмінієвих сплавів та їх зварних з'єднань // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 1990. — № 3. — С. 122–123.
2. Рязанцев В. И. Сварные конструкции из алюминиевых сплавов с литием // Авиац. пр-сть. — 2005. — № 2. — С. 32–41.
3. Влияние способа сварки на сопротивление разрушению соединений алюминийно-литиевых сплавов 1420 и 1460 / Т. М. Лабура, А. А. Бондарев, А. В. Лозовская и др. // Автомат. сварка. — 2001. — № 7. — С. 12–16.
4. Разрушение / Под ред. Г. Либовиц. Т. 6. Разрушение металлов / Пер. с англ. — М.: Мир, 1976. — 496 с.
5. Статическая прочность и механика разрушения сталей / Под. ред. В. Даля, В. Антона; пер. с нем. — М.: Металлургия, 1986. — 565 с.
6. Алюминий-литиевые сплавы. Структура и свойства / И. Н. Фридляндер, К. В. Чустов, А. Л. Березина, Н. Н. Колобнев. — Киев: Наук. думка, 1992. — 192 с.
7. Алюминиевые сплавы, содержащие литий, медь, магний / Л. Л. Рохлин, Т. В. Добаткина, Е. В. Муратова, И. Г. Королькова // Изв. АН СССР. Металлы. — 1994. — № 1. — С. 113–118.

Поступила в редакцию 01.11.2005



# ОДНОПРОХОДНАЯ ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ СВАРКА ЗАКЛАДНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ МЕТАЛЛА БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ

**Г. В. КУЗЬМЕНКО**, инж., **В. Г. КУЗЬМЕНКО**, д-р техн. наук, **В. И. ГАЛИНИЧ**, канд. техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**В. В. ОТРОКОВ**, инж., **М. А. ЛАКТИОНОВ**, канд. техн. наук (Сумское НПО им. М. В. Фрунзе)

Проанализированы способы сварки, применяемые в промышленности для соединения металла большой толщины. Отмечены преимущества введения электродного металла в стык до сварки и показана возможность устойчивого горения дуги в зазоре менее 2 мм. Для компенсации дефицита присадочного металла, возникающего в процессе образования шва, предложено через каналы в пластинчатом электроде вводить дополнительный присадочный материал. Новый способ автоматической однопроходной электродуговой сварки металла большой толщины получил название электродуговой сварки закладным электродом. Приведены технико-экономические характеристики нового способа сварки в сравнении с существующими и примеры использования его для сварки сталей различных марок.

*Ключевые слова:* электродуговая сварка, металл большой толщины, пластинчатый электрод, узкий зазор, сварка в монтажных условиях

При сварке металла большой толщины используются как однопроходные (электрошлаковая сварка и дуговая сварка с принудительным формированием), так и многопроходные (сварка под флюсом и в среде защитных газов) технологии. Однопроходные способы сварки отличаются высокой производительностью, но зачастую не обеспечивают требуемый уровень механических свойств сварного соединения вследствие перегрева металла шва и околошовной зоны. Многопроходные способы сварки позволяют получить высокий уровень механических свойств сварного соединения, но за счет существенного снижения производительности процесса. При этом достаточно велика вероятность образования дефектов — несплавлений и шлаковых включений. В последнее время получили развитие способы сварки в узкий зазор металла большой толщины. Однако требуемая точность введения электродной проволоки в глубокий и узкий зазор значительно ужесточает требования к сварочному оборудованию, а также усложняет технику сварки [1–5].

Кроме приведенных выше примеров использования известных технологий для сварки металла большой толщины, многие исследователи предлагали также технические решения, в которых электродный металл в виде пластин вводили в стык до сварки. Такой прием в отличие от общепринятого (когда электродный металл подается в виде проволоки снаружи стыка) имеет определенные преимущества в плане уменьшения сварочного зазора, упрощения оборудования и тех-

ники сварки. В работе [6] предложено вводить в зазор и зажимать между свариваемыми кромками плоский электрод, покрытый обмазкой, после чего между концом электрода и свариваемыми деталями возбуждать дугу, которая, перемещаясь самостоятельно по торцу электрода, должна проплавливать весь стык. Недостатками этого способа является отсутствие компенсации дефицита электродного металла, возникающего по мере образования шва.

Применительно к сварке металла толщиной до 40 мм известен способ «туннельной» сварки [7], согласно которому в стык вводится покрытый плавящийся мундштук овального сечения, через который дополнительно подают стальную ленту, компенсирующую дефицит электродного металла в стыке. Авторы считают, что этот способ сварки пригоден для выполнения коротких швов во всех пространственных положениях, однако при этом требуется дополнительное применение формирующих подкладочных средств и флюса для укрытия зоны сварки.

В патенте США [8] предложено выполнять автоматическую электродуговую сварку стыковых соединений большой толщины без разделки кромок с использованием введенного в стык пластинчатого электрода, толщина которого составляет 2,4...7,9 мм, а ширина примерно равна толщине свариваемых листов. Сварку выполняют в вертикальном положении снизу вверх. Пластинчатый электрод имеет сравнительно тонкое (0,25...1,25 мм) керамическое покрытие, отличающееся диэлектрическими свойствами. При сборке под сварку электрод с покрытием целиком заполняет зазор между свариваемыми кромками по всей его длине. Для получения шва, соответствую-

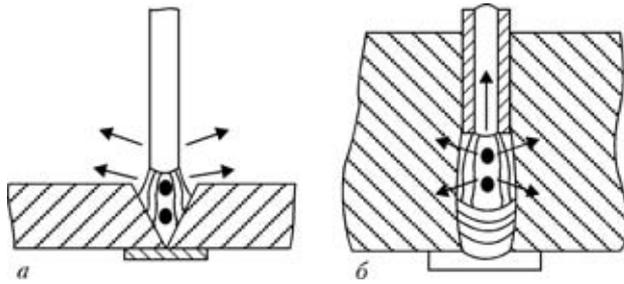


Рис. 1. Схема горения дуги в открытом (а) и закрытом (б) пространстве стыка

ющего размерам детали, длина электрода должна быть на 10...25 % больше свариваемого стыка, а его подачу необходимо осуществлять в процессе сварки. Чтобы воспрепятствовать вытеканию жидкого металла стык с обеих сторон закрывается водоохлаждаемыми медными башмаками. Покрытие на пластинчатый электрод предлагается наносить путем окунания, напыления или применять стеклоткань.

И. В. Зуев [9] для сварки толстого металла переменного сечения предлагает использовать плоский неподвижный плавящийся электрод соответствующего профиля, предварительно введенный в стык. Он связывает режимы сварки со значениями избыточного давления паров расплавленного металла, скоростью распространения звука в металле электрода, сечением электрода и безразмерным коэффициентом Грюнайзена. И. В. Зуев с сотрудниками [10] исследовали также характер перемещения дуги при дуговой сварке металлов неподвижным плавящимся электродом. Недостатками указанного способа являются отсутствие рекомендаций по стабилизации горения дуги в узком зазоре и невозможность осуществлять сварку протяженных швов из-за возникающего при заполнении стыка дефицита электродного металла.

Хотя предложенные способы сварки по тем или иным причинам не нашли промышленного применения, на наш взгляд, во всех них содержится рациональное зерно — использование плоского плавящегося электрода, предварительно введенного в зазор между свариваемыми кромками. Если предположить, что в процессе сварки будет обеспечено устойчивое горение дуги и равномерно-последовательное плавление плоского электрода с надежным оплавлением кромок стыка, то такой способ сварки может успешно использоваться для неразъемного соединения металла достаточно большой толщины. При этом пластинчатый электрод, введенный в стык, будет выполнять функцию устройства, задающего своеобразную «программу» самостоятельного движения дуги. Это позволяет отказаться от перемещения ее вдоль стыка, который используется во многих существующих способах электродуговой сварки. Поло-

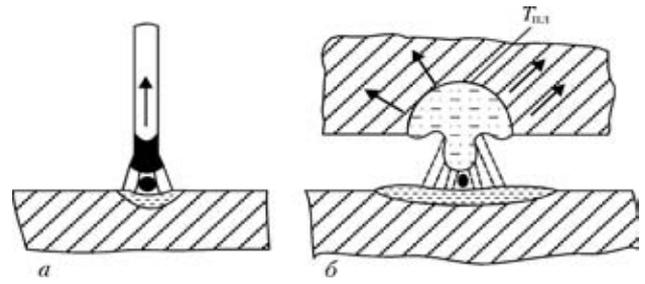


Рис. 2. Схемы плавления электродного металла при использовании проволочных (а) и пластинчатых (б) электродов ( $T_{пл}$  — температура плавления)

жительным фактором такого технологического приема является возможность более полного использования тепла дуги за счет ее горения в закрытом пространстве стыка, сопоставимого по ширине с размерами столба дуги (рис. 1). В результате этого, а также благодаря развитому сечению электрода достигается высокая эффективность его плавления (рис. 2) [11], и как следствие можно ожидать ограничения парообразования путем снижения температуры сварочной ванны [12] по сравнению с аналогичными дуговыми способами сварки с использованием проволочного электрода.

Возможность введения процесса сварки с предварительным заполнением стыка электродным металлом определяется надежностью электрической изоляции электрода от свариваемых деталей в исходном состоянии и в процессе сварки, а также стабильностью горения дуги в узком зазоре. Эти условия могут обеспечиваться за счет выбора соответствующего состава изолирующего покрытия, включающего компоненты, при нагреве образующие поток из газа, пара и шлака, который оттесняет дугу от свариваемых кромок (рис. 3). Чтобы оценить, насколько эффективен такой механизм стабилизации горения дуги, нами проведена экспериментальная сварка двух пластин из низ-

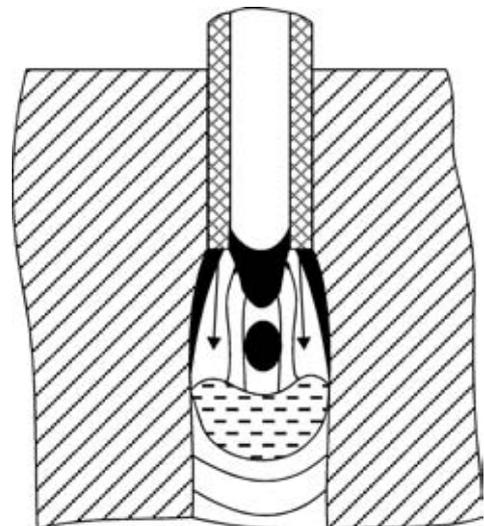


Рис. 3. Схема стабилизации и экранирования электрической дуги в узком зазоре при ее горении на торце пластинчатого изолированного электрода за счет действия потока газа, пара или шлака (показано стрелками)

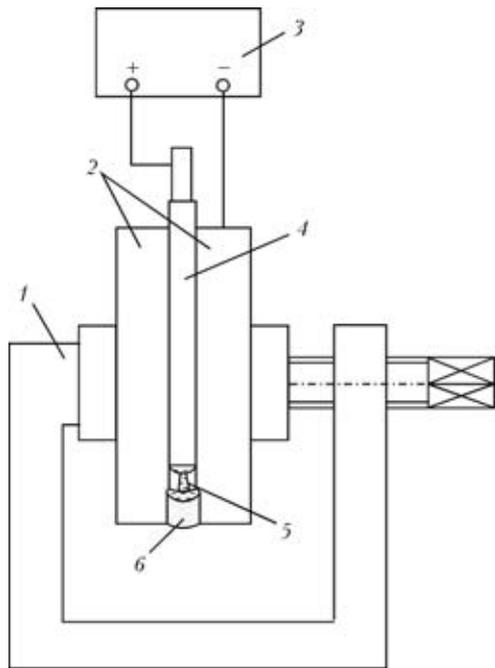


Рис. 4. Схема сварки стыка пластин с зазором 1,5 мм: 1 — трубка; 2 — свариваемые части; 3 — источник тока; 4 — пластинчатый электрод; 5 — электрическая дуга; 6 — сварной шов

коуглеродистой стали (рис. 4). Размер их свариваемых поверхностей составлял 100×150 мм, зазор — 2 мм, пластинчатый электрод толщиной 2 мм был покрыт тонким (0,2 мм) слоем изолирующего материала (конденсаторная бумага, политетрафторэтилен), для которого характерно разложение газообразных продуктов при нагреве. Электрод зажимали между шлифованными поверхностями образцов и подключали к источнику сварочного тока типа ВДУ-1201. Между концом электрода и свариваемыми пластинами возбуждалась дуга, которая, перемещаясь по торцу электрода, последовательно его переплавляла. Таким образом удалось получить сварное соединение (рис. 5) с очень узким (около 2 мм) швом. Однако качество сварного соединения оказалось неудовлетворительным из-за ограниченных возможностей металлургического воздействия на металл шва. Избавиться от пористости и науглероживания шва с помощью указанных выше изолирующих материалов не удалось. Кроме того, даже в случае применения очень тонкого покрытия по мере плавления электрода в стыке неизбежно накапливался дефицит электродного металла, в результате чего в металле шва возникали дефекты в виде пустот и несплавлений. Поэтому в дальнейшем толщину сердечника электрода увеличили до

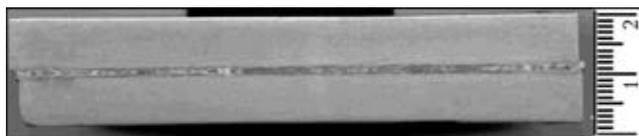


Рис. 5. Вид стыка после электродуговой сварки закладным электродом (зазор — 1,5 мм)

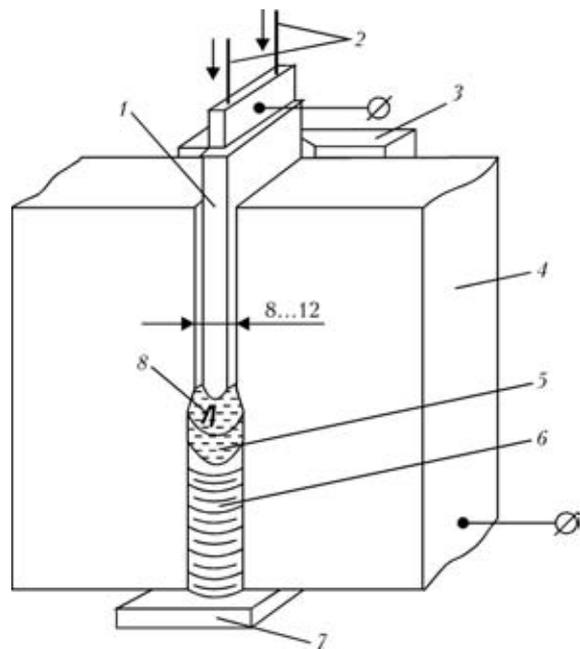


Рис. 6. Схема электродуговой сварки закладным электродом: 1 — закладной электрод; 2 — присадочная проволока; 3 — формирующая накладка; 4 — свариваемое изделие; 5 — сварочная ванна; 6 — сварной шов; 7 — подкладка; 8 — дуга

4...6 мм, что позволило выполнить в нем продольные каналы для подачи дополнительного электродного металла. В качестве изолирующего материала применяли керамическое покрытие толщиной 0,8...1,5 мм, в состав которого в определенном соотношении вводили оксиды, фториды и карбонаты, а также необходимые раскислители. Это позволило упростить требования к качеству подготовки свариваемых кромок и сборке стыка, обеспечить надежную изоляцию электрода и активно влиять на металлургические процессы в сварочной ванне.

На основе рассмотренных выше литературных данных и результатов проведенных нами исследований предложен новый способ однопроходной дуговой сварки в узкий зазор, получивший название электродуговой сварки закладным электродом (рис. 6) [13, 14]. Суть этого способа сварки заключается в следующем. Свариваемые детали без разделки кромок собирают с некоторым зазором, в который вводится изолированный плавящийся электрод с сердечником в виде пластины шириной, равной толщине деталей. Сердечник имеет продольные каналы, через них для компенсации дефицита металла в процессе сварки подаются присадочные проволоки или ленты. С обе-



Рис. 7. Вид оплавленного торца закладного электрода при электродуговой сварке металла толщиной 30 мм (толщина металлической части электрода — 6 мм, покрытия — 1,2 мм)

Таблица 1. Сравнительные показатели различных способов сварки

Параметр	Электродуговая сварка закладным электродом	Электродуговая сварка	Электродуговая сварка с принудительным формированием
Толщина металла, мм	20...100	20...200	12...60
Зазор, мм	8...12	20...40	12...25
Напряжение, В	24...30	36...55	28...48
Сварочный ток, А	400...1000	400...1200	300...700
Скорость сварки, м/ч	2,0...8,0	0,5...2,2	1,0...7,0
Удельное время сварки, с/см <sup>2</sup>	1,0...5,0	2,3...20,0	2,4...13,0
Удельная энергоёмкость, кДж/см <sup>2</sup>	25...50	100...400	40...150
Удельная материалоемкость, г/см <sup>2</sup>	6,3...9,4	15,7...31,4	9,4...19,6

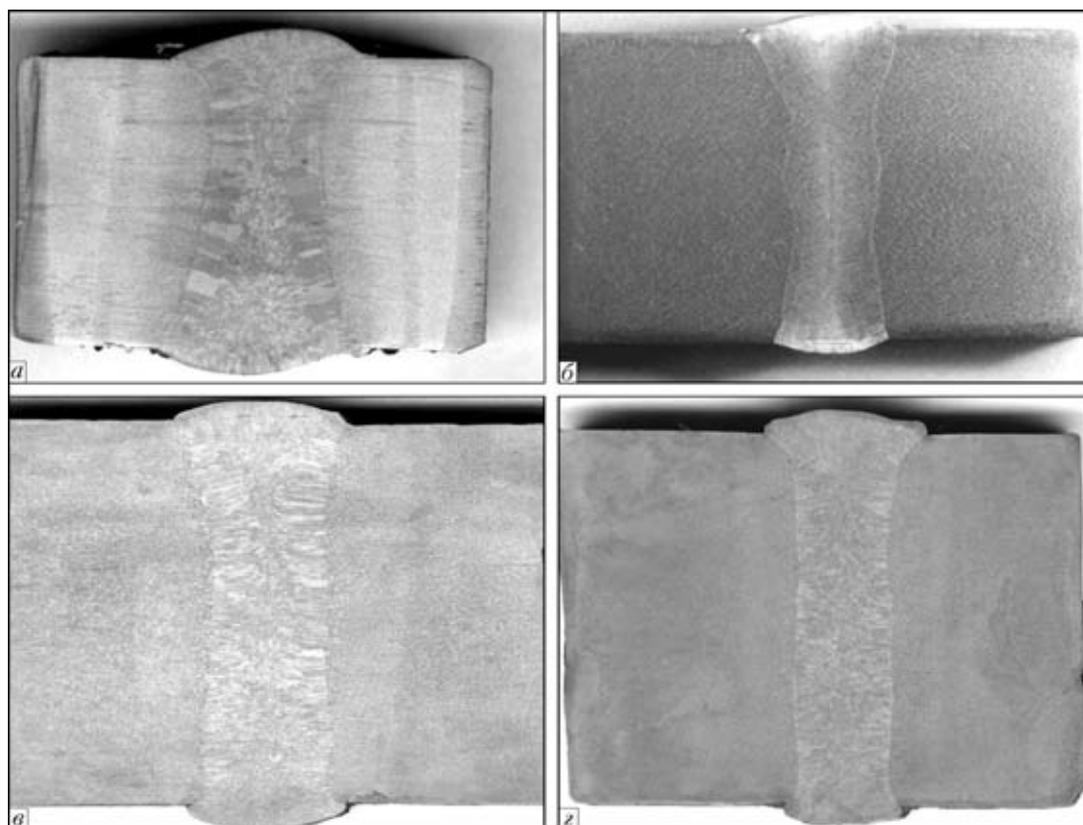


Рис. 8. Макрошлифы соединений, полученных электродуговой сваркой закладным электродом (один проход) на стали 10ХСНД толщиной 30 мм (а), 08Х17Н13М2Т толщиной 38 мм (б), 09Г2С толщиной 60 мм (в) и СтЗсп толщиной 60 мм (z)

их сторон свариваемый стык закрыт формирующими накладками. Дуга возбуждается на нижнем конце закладного электрода и, перемещаясь по его торцу, горит в пространстве, ограниченном кромками свариваемых деталей и поверхностями формирующих накладок. Под действием тепла, создаваемого дугой, происходит нагрев и плавление электрода, присадочного металла и кромок свариваемых деталей, в результате чего образуется сварной шов. Несмотря на беспорядочное перемещение по торцу электрода дуга обеспечивает устойчивое и равномерное его плавление (рис. 7). Этот эффект можно объяснить исходя из принципа Штеенбека [15], согласно которому дуга в основном горит там, где создаются условия для

ее функционирования при минимальном напряжении. Одним из основных факторов, стимулирующих перемещение дуги по торцу электрода, является увеличение расстояния между торцом электрода и сварочной ванной в результате его плавления.

При этом способе сварки за счет использования пластинчатого закладного электрода зазор между кромками составляет 8...12 мм при толщине свариваемых деталей 20...100 мм, благодаря чему обеспечивается достаточно высокая производительность процесса (суммарный коэффициент расплавления электродного и присадочного металла равен 22 г/(А·ч) и умеренное (25...50 кДж/см<sup>2</sup>) удель-



Таблица 2. Химический состав (мас. %) и механические свойства (средние значения) металла шва, выполненного на различных типах сталей

Марка стали (толщина, мм)	Массовая доля элементов, %						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu
10ХСНД (20)	0,08	0,52	1,14	0,32	1,10	0,41	0,28
10ХСНД (30)	0,09	0,44	1,19	0,29	1,21	0,46	0,26
Ст3сп (30)	0,13	0,37	0,98	0,11	0,07	0,04	—
Ст3сп (50)	0,11	0,35	0,92	0,09	0,12	0,07	—
09Г2С (60)	0,09	0,52	1,69	0,24	0,09	0,21	—
08Х17Н13М2Т (38)	0,04	0,82	0,97	19,0	12,10	1,86	—

Окончание табл. 2

Марка стали (толщина, мм)	Механические свойства металла шва (средние значения)						
	$\sigma_r$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_5$ , %	$KCU$ , Дж/см <sup>2</sup>		$KCV$ , Дж/см <sup>2</sup>	
				-40 °С	-60 °С	+20 °С	-20 °С
10ХСНД (20)	415	585	28	—	—	126	82
10ХСНД (30)	410	590	27	—	—	105	78
Ст3сп (30)	365	490	29	78	—	—	—
Ст3сп (50)	362	485	39	86	—	—	—
09Г2С (60)	390	570	28	101	75	—	—
08Х17Н13М2Т (38)	320	565	38	—	> 360	—	—

ное тепловложение. В табл. 1 приведены показатели нового способа сварки.

Электродуговая сварка закладным электродом опробована нами при сварке образцов из низкоуглеродистых (Ст3), низколегированных (09Г2С, 10ХСНД, 16Г2АФ) и высоколегированных коррозионноустойчивых (08Х18Н10Т, 08Х17Н13М2Т) сталей толщиной от 20 до 100 мм. Эксперименты показали, что предложенный способ сварки отличается высокой надежностью и позволяет получать сварные швы на сталях исследуемой толщины практически без дефектов — трещин, неплавления, пор и шлаковых включений (рис. 8). Полученные сварные швы имеют механические свойства не ниже основного металла. Даже при температуре испытания -60 °С металл шва, выполненного на низколегированных сталях, характеризуется высокой (70...80 Дж/см<sup>2</sup>) ударной вязкостью, несмотря на минимальный уровень легирования (табл. 2).

По нашему мнению, электродуговая сварка закладным электродом найдет широкое применение при изготовлении толстостенных (20...100 мм) сварных конструкций с относительно короткими (до 1000 мм) швами благодаря своей экономичности и простоте используемого оборудования. Она сможет стать альтернативой традиционным способам сварки.

## Выводы

1. Предложен новый способ автоматической однопроводной электродуговой сварки закладным

электродом металла толщиной 20...100 мм, который выполняется в вертикальном положении свариваемых деталей и предназначен в основном для сварки коротких (до 1000 мм) швов, в том числе в монтажных условиях.

2. Применение пластинчатого плавящегося электрода с изолирующим покрытием позволяет уменьшить зазор между свариваемыми кромками до 8...12 мм, благодаря чему значительно улучшаются технико-экономические показатели процесса сварки металла.

3. Компенсация дефицита электродного металла при сварке может обеспечиваться как постепенной (по мере оплавления) подачей пластинчатого электрода к сварочной ванне, так и вводом через его каналы проволок или пластин.

4. Соответствие размеров пластинчатого изолированного электрода размерам стыка и особенности горения дуги (принцип Штеенбека) на торце пластинчатого электрода задают «программу» ее самостоятельного перемещения в узком зазоре, обеспечивающую равномерное оплавление кромок свариваемых частей и образование плотного шва. Это исключает необходимость применения специальных устройств для перемещения электрода вдоль стыка и значительно упрощает используемое оборудование.

1. Технико-экономическое сопоставление различных способов сварки толстолистового металла / А. Н. Серенко, А. И. Патрикеев, В. А. Шаферовский и др. // Свароч. пр. — 1985. — № 12. — С. 3-5.

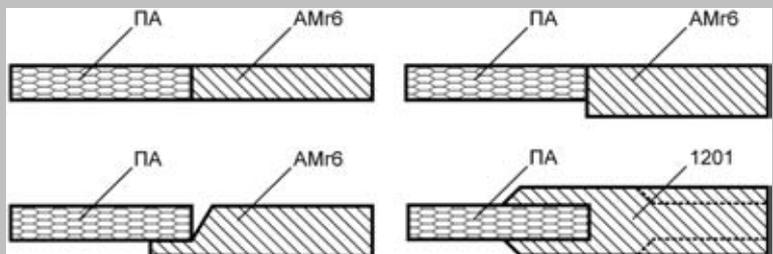
2. *Электрошлаковая сварка и наплавка* / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1980. — 511 с.
  3. *Сварка в защитных газах соединений низкоуглеродистых высоколегированных сталей по щелевой разделке* / В. К. Лебедев, Н. И. Каховский, В. С. Савченко, В. Ю. Кондратьев // *Автомат. сварка*. — 1977. — № 5. — С. 1–5.
  4. *Технологические возможности сварки под флюсом в узкий зазор среднелегированных сталей большой толщины* / Б. С. Касаткин, А. К. Царюк, Н. Е. Левенберг, Н. В. Филипенко // Там же. — 1984. — № 7. — С. 41–44.
  5. *Терещенко В. И., Либанов А. В.* Выбор и применение способов сварки при изготовлении конструкций. — Киев: Наук. думка, 1987. — 192 с.
  6. *А. с. 53628 СССР, МКИ В 23 К 09/09.* Способ электрической дуговой сварки / Ф. Ф. Пашенко. — Заявл. 16.06.37; Оpubл 31.08.38.
  7. *Разработка нового способа туннельной дуговой сварки* / К. Iio, А. Osakto, К. Kobayashi, М. Konishi // *Kobe Steel Eng. Repts.* — 1974. — 24, № 3. — Р. 93–99.
  8. *Пат. 3646312 США, МКИ В 23 К 35/22.* Electrodes for welding and the like / Н. Е. Cable, Н. Е. Cable. — Оpubл. 29.02.72.
  9. *Пат. 2115521 РФ, МКИ В 23 К 9/173 9/10.* Способ электродуговой сварки изделий сложного профиля и устройств / И. В. Зуев. — Оpubл. 20.07.98.
  10. *Движение дуги в узком зазоре при дуговой сварке металлов неподвижным плавящимся электродом* / И. В. Зуев, В. Ф. Кубарев, В. О. Бушма, Р. В. Родякина // *Технология. Приклад. физика*. — 1994. — № 3. — С. 3–7.
  11. *Размышляев А. Д., Багрянский К. В., Нестеренко К. А.* Теплосодержание капель при дуговой наплавке // *Свароч. пр-во*. — 1972. — № 5. — С. 15–16.
  12. *Маликин В. Л., Фрумин И. И.* Средняя температура сварочной ванны при наплавке ленточным электродом под флюсом // *Автомат. сварка*. — 1977. — № 6. — С. 25–28.
  13. *Пат. 2219021 РФ, МКИ В 32 К 9.14, 35/36.* Способ электродуговой сварки плавящимся электродом и электрод для его осуществления / В. Г. Кузьменко, Г. В. Кузьменко. — Оpubл. 20.12.2003.
  14. *Пат. 68361 Україна, МПК В 23 К 9/2.* Спосіб електродугового зварювання плавким електродом та електрод для його здійснення / В. Г. Кузьменко, Г. В. Кузьменко. — Оpubл. 16.08.2004.
  15. *Лесков Г. И.* Электрическая сварочная дуга. — М.: Машиностроение, 1970. — 333 с.
- Welding methods commercially applied to join heavy metal sections have been analysed. The advantages of introducing the electrode metal into a joint prior to welding are noted, and the possibility of providing a stable arc in gaps less than 2 mm in size is shown. It is suggested that the edge gap should be widened to 8-12 mm, and that the extra filler metal should be introduced through channels in flat electrodes to compensate for the filler metal shortage. A new method is offered for automatic one-pass electric arc welding of heavy metal sections, called embedded-electrode electric arc welding. Technical-economic characteristics of the new process are compared with those of the available processes, and examples of its application for welding different grades of steels are given.

Поступила в редакцию 01.09.2005,  
в окончательном варианте 12.01.2006

## ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ПЕНОАЛЮМИНИЯ

*Пеноалюминий (ПА) характеризуется уникальным сочетанием таких свойств, которых сегодня не имеет ни один конструкционный материал — негорючесть, нетоксичность, низкие звуко-, тепло- и электропроводность, малая гигроскопичность, легкость, хорошие обрабатываемость и внешний вид. Особенно привлекательно выглядит ПА в сравнении с другими материалами по массе при условии одинаковой жесткости конструкции.*

*С целью расширения областей применения ПА и создания широкой номенклатуры изделий из него были проведены исследования с использованием различных видов сварки плавлением. Получены соединения листов ПА с монолитными алюминиевыми сплавами различных систем легирования. В качестве заготовок использовали листы из ПА плотностью 0,6...0,7 г/см<sup>3</sup> толщиной 4 мм, полученные на основе сплава 1995 (система легирования Al-Zn-Mg).*



*Результаты экспериментов показали, что соединение заготовок из ПА между собой с использованием сварки плавлением не представляется возможным. Разработана технология соединения ПА через вставки из серийных алюминиевых сплавов. Аналогичная схема соединения может применяться и в других сварных конструкциях, где используются заготовки, полученные как по традиционной технологии, так и из ПА.*

*Разработаны различные схемы конструктивного оформления кромок для соединения заготовок одинаковой и различных толщин.*

**Контакты:** 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11  
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 7  
Тел.: (38044) 287 44 06, факс: (38044) 287 12 83; 287 46 30



## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ПРИ ПЛАЗМА-МИГ НАПЛАВКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В. В. ЧИГАРЕВ, д-р техн. наук, К. А. КОНДРАШОВ, канд. техн. наук, Н. А. ГРАНОВСКИЙ, асп.  
(Приазовский гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Рассмотрены особенности плазма-МИГ наплавки алюминиевых сплавов. Выявлены условия образования неметаллических включений оксидного характера в наплавленном металле, причиной которых является оксидная пленка на поверхности плавящегося электрода. Предложена схема установки для плазма-МИГ наплавки, работающая в импульсном режиме и позволяющая удалять оксидную пленку с поверхности плавящегося электрода. Полученные результаты позволяют резко снизить количество неметаллических включений в наплавленном металле.

*Ключевые слова:* плазма-МИГ, алюминиевые сплавы, неметаллические включения

Процессы плазменной сварки [1] и наплавки находят все более широкое применение в промышленности. Одним из быстроразвивающихся методов плазменной наплавки является плазма-МИГ, имеющая широкие технологические возможности и высокую производительность вследствие интенсивного нагрева плавящегося электрода внутри плазматрона [2]. Для процессов плазма-МИГ сварки и наплавки разработано специализированное оборудование [3].

Перспективно применение процессов плазма-МИГ наплавки изделий из деформируемых и литейных сплавов на основе алюминия [4]. Этот процесс особенно эффективен при восстановлении массивных деталей с большим объемом наплавленного металла. Однако, как показали исследования, в последнем имеются неметаллические включения оксидного характера, отрицательно влияющие на рабочие характеристики наплавленного металла [5]. Таким образом, имеется необходимость повышения качества наплавленного металла при плазма-МИГ наплавке алюминиевых сплавов путем уменьшения в нем неметаллических включений оксидного характера.

Целью работы является выяснение причин появления оксидных включений в наплавленном металле при плазма-МИГ процессе и разработка методов их устранения. При сварке плавящимся электродом в аргоне алюминия вследствие перехода капли через дуговой промежуток возможно окисление ее поверхности, что повышает требования к газовой защите зоны сварки. В связи с этим в качестве плазмообразующего и защитного газов применяли аргон особой чистоты, а плазматрон ПМНА-3, разработанный в ПГТУ, дополнительно был оснащен защитным соплом диаметром 80 мм, имеющим сетчатые газовые линзы. Однако замет-

ного снижения количества оксидных включений в наплавленном металле не наблюдалось, что позволило сделать вывод о попадании последних в сварочную ванну в основном с поверхности плавящегося электрода. Это объясняется тем, что процесс наплавки алюминия, как правило, производится на постоянном токе обратной полярности. Изделие в данном случае является катодом, поэтому оксидная пленка с его поверхности вследствие эффекта катодного распыления удаляется очень хорошо. При этом неплавящийся и плавящийся электроды являются анодами, вследствие чего оксидная пленка с плавящегося электрода не удаляется. При плавлении плавящегося электрода оксидная пленка переходит в ванну, при кристаллизации которой образуются включения оксидного характера.

С целью обеспечения удаления оксидной пленки с поверхности плавящегося электрода непосредственно в процессе наплавки кафедрой металлургии и технологии сварочного производства ПГТУ создана установка для плазма-МИГ наплавки (рис. 1). Как видно из рисунка, в цепь питания дуги плавящегося электрода включены два силовых транзистора 5, 7, цепи управления которых подсоединены к схеме управления, которая поочередно открывает транзисторы. При открытии од-

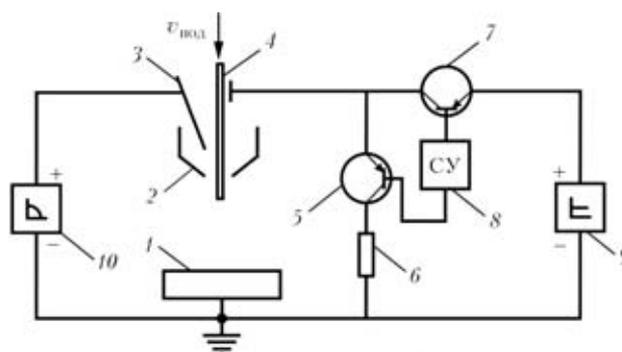


Рис. 1. Схема установки для плазма-МИГ наплавки: 1 — изделие; 2 — сопло плазматрона; 3, 4 — неплавящийся и плавящийся электрод; 5, 7 — силовые транзисторы; 6 — балластный резистор; 8 — схема управления силовыми транзисторами; 9, 10 — соответственно источник питания плазменной дуги и плавящегося электрода



ного из них второй запирается (управление транзисторами противофазное). При отпирании транзистора 7 плавящийся электрод оказывается подсоединенным к источнику питания 9, при этом горит дуга «плавящийся электрод–изделие». На приведенной диаграмме работы установки (рис. 2) этому процессу соответствует время  $t_1$ . В момент  $t_2$  транзистор 7 запирается, а 5 открывается, при этом плавящийся электрод через балластный резистор б оказывается подсоединенным к изделию 1, т. е. по отношению к неплавящемуся электроду становится катодом, в связи с чем происходит зажигание дуги на участке «неплавящийся электрод–плавящийся электрод». Ток дуги определяется резистором б. В этот момент ( $t_2$ ) происходит катодная очистка поверхности плавящегося электрода.

Данные, приведенные в работе [6], показывают, что для эффективной катодной очистки поверхности изделия из алюминия возможно применение противофазного импульсного тока с длительностью импульсов тока прямой полярности 19 и обратной полярности 3 мс. Эти данные были приняты за основу.

Наплавку производили на пластины из электротехнического алюминия толщиной 12 мм проволокой марки СвАК5 диаметром 1,6 мм на следующих режимах:

ток дуги плавящегося электрода, А .....	240
напряжение дуги плавящегося электрода, В .....	22
ток плазменной дуги, А .....	125
напряжение плазменной дуги, В .....	38
диаметр канала сопла, мм .....	6
скорость сварки, м/ч .....	18
расход плазмообразующего газа, л/мин .....	8,8
расход защитного газа, л/мин .....	52
время $t_1$ , мс .....	19
время $t_2$ , мс .....	3
ток в момент $t_2$ , А .....	30

Измерение токов плавящегося и неплавящегося электродов проводили электронными осциллографами. Поскольку плавящийся электрод погружен в столб плазменной дуги, дополнительных мер по повторному возбуждению дуги после обработки импульсов  $t_1$  и  $t_2$  не требуется, в начале каждого из режимов времени  $t_1$  и  $t_2$  дуга зажигается стабильно.

С целью оценки зоны катодной очистки на плавящемся электроде мундштук для подачи последнего вынимали из плазмотрона, а на его место вставляли заглушку с закрепленной в ней алюминиевой шиной сечением 3,0×1,6 мм. Шина проходила через весь канал сопла и выходила на 3 мм за его пределы. Источник питания 9 дуги плавящегося электрода отключался. После возбуждения плазменной дуги начинала работать схема управления 8, которая по отсчету пятидесяти импульсов,

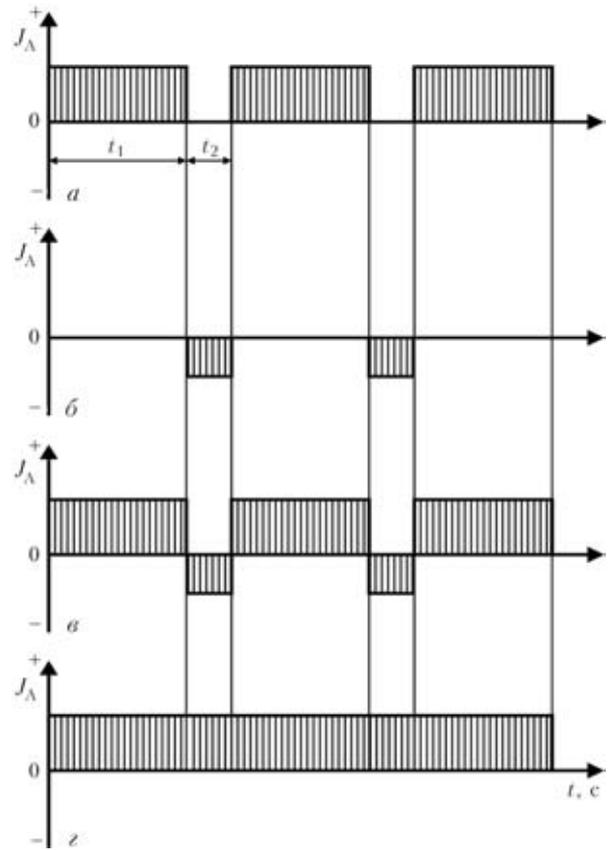


Рис. 2. Диаграмма работы установки: а, б — соответственно ток транзистора 7 и 5; в, г — ток соответственно плавящегося и неплавящегося электрода

подаваемых на транзистор 5, автоматически отключалась, при этом отключалась вся установка. После этого заглушку с закрепленной в ней алюминиевой шиной извлекали и осматривали с целью оценки эффективности катодной очистки по площади очищенного металла. Количество неметаллических включений определяли металлографическим путем на микрошлифах площадью 1 см<sup>2</sup>, вырезанных из наплавленного металла (рис. 3).

Применяя разработанный в ПГТУ универсальный однофазный источник питания, имеющий общий силовой трансформатор с отдельными вто-



Рис. 3. Микроструктура с неметаллическими включениями металла (×200), наплавленного плазмотроном ПМНА-3 в стандартном исполнении (без увеличенного сопла для подачи защитного газа). Режим наплавки непрерывный



Рис. 4. Алюминиевый образец-шина после ее испытаний внутри плазматрона

**Влияние параметров цикла  $t_1$  и  $t_2$  на процесс очистки поверхности образца-шины внутри плазматрона и количество неметаллических включений в наплавленном металле**

Значения $t_1$ и $t_2$ , мс	Площадь очистки образца-шины внутри плазматрона, мм <sup>2</sup>	Количество неметаллических включений на 1 см <sup>2</sup> сечения наплавленного валика, шт.
$t_1 = \infty, t_2 = 0$	0	17...23
$t_1 = 19, t_2 = 3$	9...12	3...6
$t_1 = 7, t_2 = 3$	14...17	0...2

ричными обмотками для питания плазменной дуги и дуги плавящегося электрода, обнаружены недостатки, присущие режиму горения дуги 19 мс и паузе в ее горении 3 мс. При таком цикле работы в обмотке трансформатора, питающей дугу плавящегося электрода, появляется постоянная составляющая, которая вызывает подмагничивание сердечника трансформатора и нарушает нормальный процесс наплавки, при этом появляются характерные вибрации силового трансформатора. Последнее связано с тем, что длительность одного полупериода переменного тока составляет 10 мс, в то время как длительность цикла тока, потребляемого дугой плавящегося электрода от источника питания, составляет  $T_y = t_1 + t_2 = 19 + 3 = 22$  мс. В связи с этим одна полуволна питающего тока используется полностью, а в другой имеется пауза 3 мс, которая и приводит к появлению постоянной составляющей в обмотке силового трансформатора, питающей дугу плавящегося электрода.

В связи с изложенным выше цикл работы установки изменили. Длительность протекания тока дуги плавящегося электрода 4 через силовой трансформатор 7 уменьшена до 7 мс (при сохранении времени паузы 3 мс). При этом изменении процесс наплавки проходил стабильно с одновременным снижением количества неметаллических включений в наплавленном металле и увеличением площади очистки образца-шины (рис. 4) внутри плазматрона (таблица).

Установлено, что оптимальная фаза начала времени  $t_2$  цикла находится в пределах 20...70 эл. град. Именно при этих условиях в наплавленном металле наблюдается практически полное отсутствие неметаллических включений оксидного ха-

рактера, а процесс наплавки проходит наиболее стабильно.

Перспективно продолжить исследования по оптимизации импульсных режимов плазма-МИГ наплавки алюминиевых сплавов, что позволит улучшить качество наплавленного металла и увеличить производительность наплавки путем дополнительного нагрева плавящегося электрода дугой неплавящийся электрод – плавящийся электрод.

## Выводы

1. Основным источником неметаллических включений оксидного характера в наплавленном металле при плазма-МИГ наплавке алюминиевых сплавов являются оксиды, находящиеся на поверхности электродной проволоки.

2. Импульсный режим горения дуги плавящегося электрода, при котором последний периодически становится катодом по отношению к неплавящемуся электроду, позволяет удалить оксидную пленку с поверхности плавящегося электрода и уменьшить количество неметаллических включений в наплавленном металле.

3. Оптимальное соотношение времени горения дуги плавящегося электрода и времени его катодной очистки соответственно 7 и 3 мс, что позволяет наиболее полно удалять оксиды с поверхности плавящегося электрода и применять в качестве источника питания однофазный выпрямитель.

4. При применении однофазного выпрямителя оптимальной фазой начала катодной очистки является 20...70 эл. град.

1. Макаренко Н. А., Гвоздецкий В. С. Плазменная сварка // Автомат. сварка. — 2000. — № 12. — С. 26–30.
2. Особенности плавления электродной проволоки при наплавке способом плазма-МИГ / В. В. Чигарев, Н. А. Макаренко, К. А. Кондрашов, Н. М. Воропай // Там же. — 2001. — № 8. — С. 12–15.
3. Универсальная установка для плазма-МИГ сварки и наплавки / А. Н. Корниенко, Н. А. Макаренко, К. А. Кондрашов, А. В. Грановский // Свароч. пр-во. — 2001. — № 9. — С. 30–31.
4. Shevers A. Plasma-MIG lassen van aluminium kanvordelen bieden voven MIG lassen // Bedrijf en techn. — 1997. — 11, № 98. — P. 140–142.
5. Газоэлектрическая сварка алюминиевых сплавов / С. Н. Киселев, В. А. Хаванов, В. В. Рошин, В. И. Таран. — М.: Машиностроение, 1972. — 176 с.
6. Млаховский В. А. Плазменная сварка. — М.: Высш. шк., 1974. — 80 с.

Peculiarities of plasma-MIG cladding of aluminium alloys are considered. As found, the cause of formation of oxide-type non-metallic inclusions in the deposited metal is an oxide film on the consumable electrode surface. Suggested is the diagram of the plasma-MIG cladding unit, which operates in the pulsed mode and allows removal of the oxide film from the consumable electrode surface. The results obtained allow a dramatic decrease in the amount of non-metallic inclusions in the deposited metal.



## МАГНИТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ В ПРОЦЕССАХ НАНЕСЕНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

**В. Н. ПАЩЕНКО**, канд. техн. наук, **С. П. СОЛОДКИЙ**, инж. (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Исследована возможность управления пространственным расположением струи низкотемпературной плазмы путем наложения на начальный участок плазменного потока поперечного магнитного поля. Установлено, что основными параметрами, влияющими на угол отклонения струи, являются значения тока управляющего электромагнита и удельной энергии плазменной струи. Показано, что направление отклонения плазменного потока зависит от направлений магнитного потока в зоне взаимодействия и кртки газового потока.

*Ключевые слова:* газотермическое нанесение покрытий, низкотемпературная плазма, плазменный поток, магнитное управление, плазменная струя, угол отклонения

Потоки низкотемпературной плазмы широко используются в технологиях инженерии поверхности — при наплавке, напылении, закалке и др. Рациональная организация упомянутых технологических процессов невозможна без оперативного управления пространственным положением рабочего тела относительно объекта воздействия.

Особенно актуальна проблема взаимного пространственного размещения фаз (газообразной и твердой) в гетерофазном потоке при газотермическом нанесении покрытий. В настоящее время преимущественно используют газодинамические и механические способы формирования необходимой исходной структуры газопорошкового потока — подача порошка через систему каналов, манипулирование параметрами транспортирующего газа, варьирование местом и направлением ввода дисперсного материала, сдувание или отсасывание основной несущей струи потоком дополнительного вещества и пр. [1].

Между тем, наличие в потоке высокотемпературного газа определенного (часто довольно значительного) количества движущихся заряженных частиц позволяет (теоретически) для коррекции направления их движения использовать электромагнитные поля. Последние достаточно широко применяют в сварочных процессах с целью управления объектами, через которые протекает электрический ток. Работы в указанном направлении ведутся в ИЭС им. Е. О. Патона и НТУУ «Киевский политехнический институт».

Новой областью применения магнитного управления могут быть потоки низкотемпературной плазмы.

Содержание заряженных частиц в объеме высокотемпературного газа, в частности плазменной

струи, зависит от достигнутых температур. При этом в реальных условиях распределение температуры по сечениям потока низкотемпературной плазмы происходит неравномерно.

Температура на оси плазменной струи, как правило, в несколько раз превышает ее среднемассовую температуру. Так, при среднемассовой температуре струи 2000...4000 К температура в приосевой зоне может составлять  $(9...20) \cdot 10^3$  К [2].

Косвенно это подтверждается результатами измерений распределения температуры и энтальпий по сечению плазменных струй воздуха и смеси воздуха с углеводородными газами [3]. Согласно проведенным измерениям температура на оси плазменной струи составляет  $(3,5...4,0) \cdot 10^3$  К на дистанции 40 мм, а характер зависимости температуры от расстояния, измеряемого от среза сопла плазмотрона, позволяет считать, что осевая температура будет равна  $(9...12) \cdot 10^3$  К.

Такой уровень температуры предполагает наличие значительного количества ионизированных компонентов плазмообразующего газа в пределах начального участка плазменной струи. Термодинамические расчеты зависимости состава воздушной плазмы и плазмы продуктов сгорания углеводородных газов от температуры [4] свидетельствуют о существенном возрастании содержания электронного газа при температуре более 7000 К. Например, при 9000 К оно составляет 1 об. %, а при 12000 К — 12 об. %. Одновременно увеличивается содержание положительных однократно ионизированных ионов  $N^+$ ,  $O^+$  (воздушная плазма),  $C^+$ ,  $H^+$ ,  $N^+$ ,  $O^+$  (плазма смеси воздуха с углеводородными газами).

Наличие движущихся заряженных компонентов плазмообразующей среды создает предпосылки для использования магнитных полей с целью управления траекторией движения определенной части потока низкотемпературной плазмы, а через

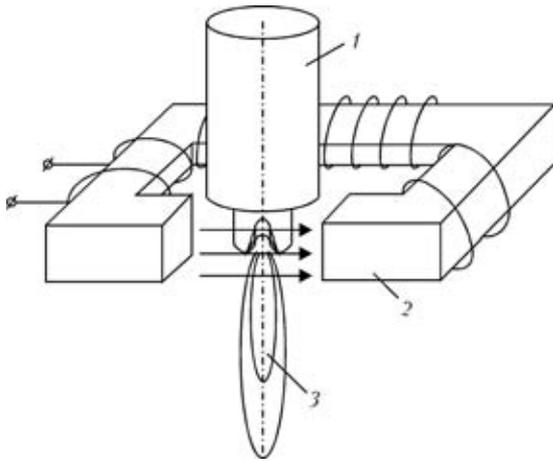


Рис. 1. Схема расположения генерирующей и управляющей систем экспериментальной установки: 1 — плазматрон; 2 — электромагнит; 3 — объект управления (струя низкотемпературной нетокосоведущей плазмы)

нее — для коррекции пространственного положения всей плазменной струи.

Исследование влияния магнитного поля на потоки низкотемпературной плазмы проводили на экспериментальной установке, состоящей из генератора низкотемпературной плазмы и магнитной системы, совмещенной с сопловой частью плазмотрона (рис. 1).

Эксперименты проводили на дуговом генераторе плазмы линейной схемы с вихревой подачей плазмообразующего газа и автогазодинамической стабилизацией длины дуги, использующем в качестве плазмообразующего газа воздух или смесь воздуха с углеводородными газами. Ток дуги изменяли в диапазоне 130...200 А при общей мощности плазмотрона 18...22 кВт. Расход плазмообразующего газа составлял 3,5...5,0 м<sup>3</sup>/ч.

Управляющая магнитная система представляла собой электромагнит постоянного тока в виде катушки, намотанной медным проводом на ферромагнитный П-образный сердечник. Электромагнит неподвижно зафиксирован относительно сопловой системы плазмотрона таким образом, чтобы

начальный участок плазменной струи находился между полюсами электромагнита.

Направление потока и значение магнитной индукции задавали исходя из направления тока, его значения в катушке и изменяли по заданной циклограмме с помощью системы управления электромагнитом. Пространственное положение плазменной струи фиксировали цифровой видеокамерой с автоматической регулировкой яркости.

В качестве переменных параметров использовали ток в электромагните  $I_{э.м}$ , ток дуги  $I_{д}$  и давление плазмообразующего газа  $p_{п.г}$ . Диапазон изменения этих параметров в процессе эксперимента определяли следующими факторами: возможностями магнитной системы —  $5 < I_{э.м} \leq 15$  А; допустимым током термохимического катода плазмотрона (верхний предел) и возможностями источника питания (нижний предел) —  $130 \leq I_{д} \leq 200$  А; условиями устойчивого горения дуги в пределах дугового канала, зависящими от расхода плазмообразующего газа (2,5 м<sup>3</sup>/ч — нижний предел, соответствующий втягиванию дуги в узкую часть дугового канала, и 5 м<sup>3</sup>/ч — верхний предел, соответствующий выносу части дуги за пределы канала). Изменению расхода при обработке результатов поставлено в соответствие изменение давления плазмообразующего газа в диапазоне  $0,3 \leq p_{п.г} \leq 0,5$  МПа.

Обработку результатов измерений (цифровые снимки потока плазмы) проводили с помощью пакета прикладных программ «Photoshop 7» путем наложения нескольких изображений и измерения угла отклонения оси плазменного потока при воздействии магнитного поля относительно оси потока плазмы в отсутствие поля.

На рис. 2, а представлено изображение струи плазмотрона под действием магнитного поля с фиксированным направлением магнитной индукции. Изменение направления тока в электромагните управляющей системы приводит к отклонению струи плазмотрона в противоположную

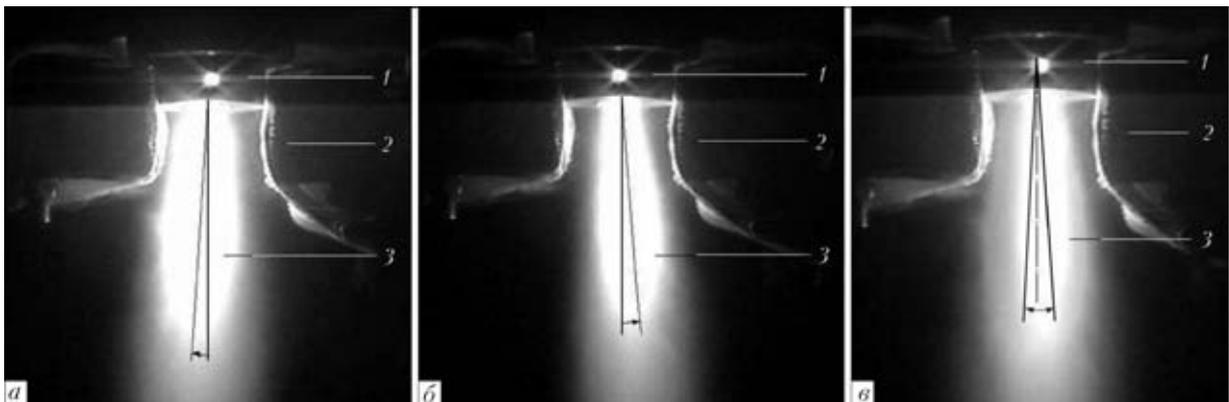


Рис. 2. Совмещенные снимки воздушной плазменной струи в отсутствие магнитного воздействия и при его наличии: а, б — направление магнитной индукции соответственно справа налево и слева направо; в — попеременное изменение направления постоянного тока в управляющем электромагните; 1 — выходной электрод плазмотрона; 2 — полюса электромагнита; 3 — плазменная струя

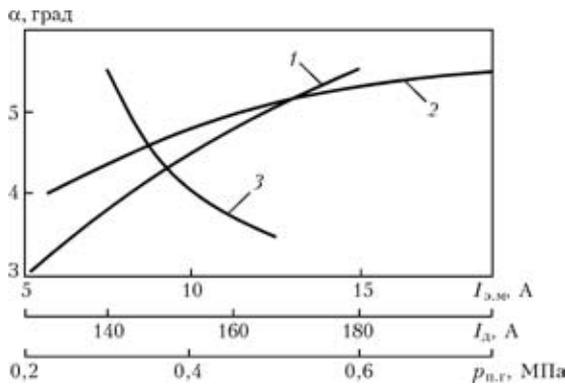


Рис. 3. Зависимость угла отклонения плазменной струи от параметров тока электромагнита ( $I$ ), тока дуги (2) и давления плазмообразующего воздуха (3)

сторону, практически на такой же угол (рис. 2, б). На рис. 2, в представлен результат совмещения трех изображений в отсутствие и при наличии поля разной полярности.

Угол отклонения плазменной струи  $\alpha$  (в одну сторону от исходного положения) увеличивался с повышением тока в электромагните и тока дуги и уменьшался при повышении расхода плазмообразующего газа (рис. 3).

Повышение тока электромагнита вызывает возрастание магнитной индукции в зоне взаимодействия и в соответствии с формулой Лоренца увеличение силы, которая действует на заряженную движущуюся частичку.

Увеличение тока дуги или уменьшение расхода плазмообразующего газа (а также их одновременное изменение) при неизменных других параметрах повышает удельную мощность на единицу объема плазмообразующего газа. Соответствующее этому повышение температуры плазмы приводит к увеличению содержания заряженных частиц и скорости их движения, а значит, и эффективности воздействия магнитного поля на плазменный поток.

В исследованном диапазоне изменения параметров режима работы плазмы суммарный угол отклонения плазменной струи (в обе стороны от среднего положения) составляет  $11...12^\circ$ .

Аппроксимация полученных экспериментальных кривых позволила получить эмпирическую зависимость угла отклонения плазменной струи  $\alpha$  от упомянутых выше параметров режима работы генератора плазмы в исследованных диапазонах:

$$\alpha = 0,886 \frac{(I_{э.м.})^{0,41} (I_{д.} - 116,6)^{0,175}}{(27,14 p_{п.г.} - 7,14)^{0,24}}$$

В связи со сложностью и многофакторностью процессов, происходящих при магнитном воздействии на движущийся поток закрученного газа, трудно составить полную физическую картину характера движения частичек газового потока (в том числе и нейтральных). Необходимы дополнительные исследования поведения плазменных струй в поперечном магнитном поле при различных значениях крутки газового потока с учетом взаимного положения магнитной системы и токоведущих участков столба дуги, результаты которых позволят выявить природу экспериментально установленных фактов.

Экспериментальное подтверждение возможности магнитного управления пространственным положением плазменной струи наряду с альтернативными методами управления открывает дополнительные перспективы для организации, например, процессов модификации поверхностных слоев изделий или нанесения плазменных покрытий, в том числе сложной макроструктуры.

### Выводы

1. Наложение на плазменную струю поперечного магнитного поля приводит к отклонению направления движения газового потока.
2. Угол отклонения плазменной струи определяется параметрами режима работы генератора плазмы и управляющей магнитной системы и составляет  $5...6^\circ$ .
3. Пространственная ориентация плоскости, в которой наблюдается отклонение плазменной струи, зависит от направлений магнитного потока и крутки газового потока.

1. Пащенко В. М. Обладнання для газотермічного нанесення покриттів: Навч. посіб. — К.: ІВЦ «Політехніка», 2001. — 416 с.
2. Суриц А. Л. Плазмохимические процессы и аппараты. — М.: Химия, 1989. — 304 с.
3. Пащенко В. М., Солодкий С. П. Дослідження впливу геометричних та режимних параметрів плазмотронів із комбінованим підведенням енергії на температурні та швидкісні поля плазмового струменя // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2005. — № 2 (40). — С. 72–79.
4. Карп И. Н., Марцовой Е. П., Пащенко В. Н. Математическое моделирование нагрева и движения частиц в плазменной струе // Хим. технология. — 1985. — № 6. — С. 27–33.

The paper studies the possibility of controlling the spatial position of a low-temperature plasma jet by superposition of a transverse magnetic field on the initial region of the plasma flow. It is established that the main parameters influencing the angle of the jet deviation, are the controlling electric magnet current and specific energy of the plasma jet. It is shown that the direction of plasma flow deviation depends on the directions of the magnetic flow in the interaction zone and direction of the gas flow twist.

Поступила в редакцию 15.12.2005, в окончательном варианте 06.02.2006



## Разработки фирмы «ФРОНИУС»

**Сварка металлическим электродом + сварка неплавящимся электродом  
в инертном газе**



**TransPocket  
2500, 3500**

**TransPocket  
2500 TIG,  
3500 TIG**

*Технические характеристики*

Параметр	TP 2500	TP 2500 TIG	TP 3500	TP 3500 TIG
Напряжение сети (+/- 15 %), В	3×380	3×380	3×380	3×380
Диапазон сварочного тока, А	10...250	10...250	10...350	10...350
Сварочный ток (10 мин/40 °С, ПВ 35 %), А	250	250	350	350
Масса, кг	12,5	12,5	18	18

**Область применения**

Для особо мобильного использования при монтажных и ремонтных работах в самых жестких условиях эксплуатации.

<i>Перечень основных возможностей</i>	TP 2500	TP 2500 TIG	TP 3500	TP 3500 TIG
Функция «анти-стик» для ММА	•	•	•	•
Сварка ВИГ — возбуждение дуги прикосновением		•		•
Пригодность к работе с электродами с целлюлозным покрытием при сварке вертикального шва сверху вниз	•	•	•	•
Дистанционное управление		•		•
Проверка наличия газа				•
Пригодность к работе от генератора	•	•	•	•
Функция «Hot start» (кратковременное увеличение сварочного тока)	•	•	•	•
Микропроцессорное управление	•	•	•	•
Управляемый температурой вентилятор	•	•	•	•
Пылезадерживающий фильтр	•	•	•	•
Комфортабельная автоматическая остановка сварочного процесса TCS		•		•
Бесступенчатая настройка сварочного тока через сварочную горелку		•		•
Защита от превышения температуры	•	•	•	•
<i>Настраиваемые параметры</i>				
Динамика	•	•	•	•
Бесступенчатая регулировка сварочного тока	•	•	•	•
Вертикальная характеристика	•	•	•	•
Импульсная дуговая сварка TIG		•		•



УДК 621.79(088.8)

## ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА\*

**Горелка для дуговой сварки в защитных газах**, отличающаяся тем, что дополнительно содержит механизм подачи электродной проволоки в виде протяжной головки и электродвигателя с полым валом, установленных в центральной части несущего элемента корпуса — продольной токопроводной планки, на краях которой закреплены передний и задний фланец. Приведены и другие отличительные признаки горелки. Патент Украины 74709. Б. И. Мартыненко, С. М. Сверчков, Ф. М. Диденко и др. (ОАО «Украинский НИИ технологии машиностроения») [1].

**Устройство для сварки неповоротных стыков**, отличающееся тем, что дополнительно включает размещенные на планштайбе протяжную головку и специальный желоб, которые обеспечивают прецизионную подачу проволоки в зону сварки, при этом механизм подачи присадочной проволоки содержит кассету с проволокой, электродвигатель с полым валом и гибкий полый вал, соединенный с протяжной головкой. Патент Украины 74658. Б. И. Мартыненко, С. М. Сверчков, Ф. М. Диденко и др. (То же) [1].

**Способ термической резки металлических листов**, отличающийся тем, что плазменный резак перемещают с помощью портала и каретки до совмещения оси плазменного резака с центром вырезаемого отверстия и после остановки приводов портала и каретки перемещают плазменный резак в горизонтальном направлении относительно каретки на расстояние, равное радиусу вырезаемого отверстия, после чего вращают плазменный резак вокруг вертикальной оси, проходящей через центр вырезаемого отверстия, и при включенном плазменном резаке вырезают круглое отверстие. Декларативный патент Украины 11843. В. А. Найдорф (ООО Опытный завод технологического оснащения «Никком») [1].

**Машина для термической резки металлических листов**, отличающаяся тем, что она оснащена средствами для линейного горизонтального перемещения плазменного резака относительно каретки и вращения его вокруг вертикальной оси. Декларативный патент Украины 11849. В. А. Найдорф (То же) [1].

**Устройство для формирования соединения при контактной стыковой сварке трубы с заглушкой**, отличающееся тем, что часть изоляционного элемента обоймы, состоящей из изоляционного и металлического элементов, размещена между токоподводом и кольцевым упором-холодильником, а толщина участка внутреннего диаметра кольцевого металлического элемента обоймы выполнена такой величины, которая равна сумме толщины одной пластины кольцевого упора-холодильника и величины заглиблення торца трубы в середину участка металлического элемента обоймы. Декларативный патент Украины 12191. Н. А. Лаврентьев, В. С. Красноуцкий (ННЦ «Харьковский физико-технический институт») [1].

**Установка для лазерной сварки трубопроводов**, отличающаяся тем, что сварочная головка, лазер или как минимум излучатель лазера соединены механически между собой и вы-

полнены с возможностью размещения в середине трубопровода, а каждое гнездо магазина оснащено штангой подвода коммуникаций с размещенным на ее конце механизмом соединения и разъединения коммуникаций с лазером и сварочной головкой в середине приваренной трубы. Декларативный патент Украины 12315. И. Ю. Новикова (ЗАО «КЭМЗ «Сварка») [1].

**Гратосниматель**, отличающийся тем, что он имеет вставленное по ходу металла возле первого опорного ролика защитное устройство, экран и открытый короб с наклонным днищем и разновеликими боковыми стенками. Приведены и другие отличительные признаки. Декларативный патент 12216. С. А. Гриценко, Ю. В. Сусь, И. А. Евгиненко и др. (ЗАО «Новокраматорский машиностроительный завод») [1].

**Электросварочный аппарат**, содержащий первый источник питания с первым выходом, создающий первый выходной переменный ток между электродом и свариваемой деталью, и второй источник со вторым выходом, создающий второй выходной переменный ток между электродом и свариваемой деталью, при этом электросварочный аппарат представляет собой систему дуговой электросварки для создания сварочной дуги переменного тока между электродом и деталью. Приведены и другие отличительные признаки. Патент Украины 74884. В. С. Хьюстон, Р. К. Майерз, Е. К. Става (Линкольн Глобал, Инк., США) [2].

**Способ дуговой двухпроходной сварки кольцевого стыка труб без скоса кромок неплавящимся электродом в защитном газе**, отличающийся тем, что неполными проплавлениями с внешней и внутренней стороны при вращении кольцевого стыка образуют полный, сплошной по всей толщине кромок проплав, для чего на поверхность кромок наносят активированный флюс и поддерживают энергию сварки не больше 0,95 на каждом проходе и не меньше 1,20 на обоих проходах от погонной энергии для сквозного проплавления. Патент Украины 74936. В. М. Кулик, М. М. Савицкий, А. Ф. Лупан и др. (ИЭС им. Е. О. Патона) [2].

**Установка для контактной стыковой сварки трубчатой оболочки с заглушкой**, отличающаяся тем, что зажим электрододержателя заглушки выполнен в виде ползуна, а упорный элемент выполнен охватывающим ползун электрододержателя и закреплен на корпусе — направляющем последнего со стороны сварочной камеры, при этом на торцевой поверхности упорного элемента, повернутой к стакаподобному корпусу, а также между упорным элементом и ползуном электрододержателя размещены уплотнительные элементы. Патент Украины 65292. Н. А. Лаврентьев, Н. Н. Белаш, В. С. Красноуцкий (ННЦ «Харьковский физико-технический институт») [2].

**Состав покрытия для защиты поверхности от налипания брызг расплавленного металла**, отличающийся тем, что в качестве углеродсодержащих соединений содержит бурый уголь и сахар, а также дополнительно едкий натр и воду при следующем соотношении компонентов, мас. %: 10...20 бурого угля; 1,0...4,0 едкого натрия; 10...20 сахара; остальное вода. Патент Украины 64435. В. А. Кучеренко, О. В. Погребной (ООО «Торгово-промышленная компания «Партнер») [2].

\* Приведены сведения о патентах Украины, опубликованных в официальном бюллетене «Промислова власність» за 2006 г. (в квадратных скобках указан номер бюллетеня).



**Способ электродуговой наплавки двумя автоматами**, отличающийся тем, что токоподвод дополнительно осуществляют до середины детали, а величину тока, текущего до середины, устанавливают в зависимости от тока, который течет до концов, в соответствии с выражением:  $I = (1,3...1,6)I_1$ , А, где  $I$  — величина тока, текущего до середины детали, А;  $I_1$  — величина тока, текущего до конца деталей, А. Патент Украины 75256. В. С. Бойко, С. В. Щетинин, В. В. Климанчук и др. (Приазовский ГТУ, ОАО «Мариупольский меткомбинат им. Ильича») [3].

**Модификация поверхности**, которая включает приведение в относительное движение изделия и мощного пламени в пересекающем направлении, чтобы подвергнуть влиянию мощного пламени ряд местоположений на изделии; и в каждом местоположении приведения мощного пламени в движение в множестве направлений по отношению к изделию осуществляют заблаговременно заданным образом, за счет чего в каждом местоположении материал изделия плавят и перемещают под действием мощного пламени так, чтобы сформировать заглабление или отверстие. Патент Украины 75144. Б. Г. И. Данс (Дзе Велдинг Инститьют, Великобритания) [3].

**Порошковая проволока для подводной сварки стали 17Г1С**, отличающаяся тем, что оболочка ее выполнена из технически чистого никеля, а сердечник дополнительно содержит фторид кальция, фторцирконат калия, полевого шпата и алюминий при следующем соотношении компонентов, мас. %: 8...10 фторцирконата калия; 4...10 полевого шпата; 4...6 алюминия; остальное — фтористого кальция, при этом коэффициент заполнения порошковой проволоки составляет 22...25 %. Патент Украины 75174. С. Ю. Максимов, А. Г. Радзиевская, А. Г. Пирогов (ИЭС им. Е. О. Патона) [3].

**Способ сварки термитным карандашом, который проводят с помощью электрода**, изготовленного из стальной проволоки и покрытого мелким мелом на силикатном клее, при этом термический карандаш также изготавливают из стальной проволоки, покрывают ее алюминиевыми и железными опилками на силикатном клее, а на конце карандаша выполняют забравку из бертолетовой соли на силикатном клее, которая инициирует горение и сварку металлов. Декларативный патент Украины 13200. Н. Р. Набок [3].

**Экзотермический стержень для подводной кислородно-термической резки металлов с автономным зажиганием**, отличающийся тем, что головная часть стержня содержит горючую шашку, длина которой составляет 0,1...0,2 длины стержня, причем отмеченная шашка имеет центральное отверстие диаметром 1...3 мм и содержит капсуль-инициатор. Приведены и другие отличительные признаки. Декларативный патент Украины 12966. Б. В. Лебедев, В. Г. Лебедев, А. П. Рудинский [3].

**Экзотермический стержень для подводной кислородно-термической резки металлов**, отличающийся тем, что внутренний диаметр трубы (корпус длиной до 500 мм) составляет

10...18 мм, элементы, горящие в кислороде, представляют собой шашки, высота которых не больше двух их диаметров, прессованных из порошков материалов, горящих в кислороде с высокой удельной теплотой сгорания, причем отмеченные шашки соединены между собой таким образом, что хвостовая часть предыдущей шашки соединяется с основной частью последующей шашки, образуя сплошной стержень. Декларативный патент Украины 12967. Б. В. Лебедев, В. Г. Лебедев, А. П. Рудинский [3].

**Стержень для подводной кислородно-термической резки металлов в технологической оболочке**, отличающийся тем, что внутренний диаметр оболочки составляет 8...18 мм, один или несколько элементов из материала, горящего в кислороде с высокой удельной теплотой сгорания, расположены в оболочке, имеют центральное удлиненное отверстие диаметром 1...3 мм, а стержень может иметь произвольную длину и произвольное сечение. Декларативный патент Украины 12968. Б. В. Лебедев, В. Г. Лебедев, А. П. Рудинский [3].

**Экзотермический стержень для подводной кислородно-термической резки выполнен из прутка произвольного сечения**, который вписывается в круг диаметром 6...16 мм и с внутренним центральным отверстием диаметром 2...3 мм, изготовленный путем прокатки, прессования или литья из материала, горящего в кислороде с высокой удельной температурой горения, например, из магния, алюминия, титана и/или других сплавов. Декларативный патент Украины 12969. Б. В. Лебедев, В. Г. Лебедев, А. П. Рудинский [3].

**Экзотермический стержень для подводной кислородно-термической резки металлов**, отличающийся тем, что внутренний диаметр трубы (корпус длиной до 500 мм) составляет 10...18 мм, а проволоки, горящие в кислороде, занимают 0,7...0,9 внутреннего объема трубы и имеют диаметр 0,2...1 мм. Декларативный патент Украины 12970. Б. В. Лебедев, В. Г. Лебедев, А. П. Рудинский [3].

**Способ электрошлаковой наплавки**, отличающийся тем, что наплавку ведут под углом 10...75° к горизонтальной поверхности, при этом наплавленную заготовку вращают относительно кристаллизатора, а последний перемещают вдоль напыляемой заготовки со скоростью, определяемой датчиком контроля уровня жидкого металла, а плавящийся электрод цилиндрической формы подают в жидкую ванну с заданной скоростью, обусловленной режимом процесса наплавки. Декларативный патент Украины 13365. А. В. Попов, Б. А. Попов (ЧФ «Латимерия») [3].

**Прижимное устройство**, отличающееся тем, что механизм натяжения гибкого элемента выполнен в виде гибких тяг, расположенных параллельно одна другой и закрепленных с помощью осей на пространственной раме, по краям в ее ушках, а посередине — с помощью ценных тяг. Приведены и другие отличительные признаки. Декларативный патент Украины 13158. Н. В. Шабалдак, О. Е. Шканов (ОАО «Головной специализированный КТИ») [3].



## По зарубажным журналам\*

*RIVISTA ITALIANA DELLA SALDATURA (Италия) 2005. — An. LVII. — № 4 (Luglio-Agosto) (итал. яз.)*

**Pekkari B.** Сварка и соединение в будущем, с. 493–500.

**Lauro A. et al.** Экспериментальная методика Американского института нефти по выполнению надзора и техобслуживанию надземных резервуаров-хранилищ, с. 505–512.

**Menin R.** Новейшее решение для сварки CO<sub>2</sub>-лазером кузовов автомобилей — установка «Agilaser», с. 515–519.

**Baratta F., Iovacchini M.** Системы компьютеризированной томографии как инструмент неразрушающего контроля, с. 523–533.

**Costa L.** Сварка и ее опасность для здоровья — национальный и международный обзор, с. 535–545.

**Farrar J. C. M.** Измерение числа феррита в реальных сварных изделиях (окончательный отчет), с. 549–557.

*SCHWEISS- & PRUEFTECHNIK (Австрия) 2005. — № 7 (нем. яз.)*

**Разрушение** сварных соединений, с. 99–105.

**Автофургон** успешно заменяет сварку МАГ пайкой МИГ, с. 105.

*SCHWEISS- & PRUFTECHNIK (Австрия) 2005. — № 8 (нем. яз.)*

**Winkler F.** Экономическое применение соединительной порошковой проволоки, подводящей шлак, с. 115–117.

**Высокопрочные** стали для гидроэлектростанций, с. 126–128.

*SCHWEISSEN und SCHNEIDEN (Германия) 2005. — № 6 (нем. яз.)*

**Hartman G. F.** Хороший опыт с кооперацией предприятий, с. 240.

**Разрабатывается** новая стратегия стандартизации в Германии, с. 242.

**Обеспечивать** и совершенствовать качество подготовки инженеров, с. 242–243.

**Weigert J.** Изготовление охлаждающих панелей методом электронно-лучевой сварки, с. 244–245.

**Монтаж** стального навеса сооружения для культурных мероприятий, с. 245.

**Цифровая** высокопроизводительная сварка открывает новые перспективы, с. 246.

**Система** контроля качества в реальном масштабе времени для лазерной сварки термопластов, с. 246–247.

**Muller M. et al.** Допуски на технологию лазерной сварки пайки без флюса, с. 250–255.

**Sitte G.** Сварка алюминиевых сэндвич-композиатов, с. 256–263.

**Kranz B., Dilger K.** Распространение концепции структурных напряжений на сварные соединения в алюминиевых конструкциях с надрывами не на переходе от шва к основному металлу, с. 264–267.

**Aichele G.** Из истории сварочной техники: нужно ли переписывать историю сварочной техники?, с. 268–270.

\* 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).



**О работе** службы информации — «Обзор литературы по сварке и родственным способам», с. 270–273.

**О работе** службы информации — «Обзор литературы по неразрушающему контролю», с. 274–277.

*SUDURA (Румыния) 2005. — Vol. XV, № 4 (румынск. яз.)*

**Dumbrava D. et al.** Экспериментальное исследование и аналитические оценки остаточных напряжений при сварке алюминия, с. 5–12.

**Knopp N., Killing R.** Высокотемпературная дуговая пайка оцинкованных тонких листов — надежно и экономично (Ч. 2), с. 13–17.

*SUDURA (Румыния) 2005. — Vol. XV, № 5 (рум. яз.)*

**Cocard M., Grozav I.** Оптимизация способов сварки полиэтиленовых труб PE 80 с помощью метода RSD (плана экспериментов на поверхности отклика), с. 5–13.

**Kreye H., Stoltenhoff T.** Холодное напыление для получения низкооксидных металлических покрытий, с. 15–18.

**Saggau R. et al.** Коррозия деталей из нержавеющей стали, вызванная побежалостью, с. 19–22.

*TRANSACTION of JWRI (Япония) 2005. — Vol. 34, № 1 (англ. яз.)*

**Ikeuchi K. et al.** Влияние реакционного слоя на поверхности раздела на прочность соединения, выполненного сваркой трением, с. 1–10.

**Ueyama T. et al.** Высокоскоростная сварка листовой стали с помощью установки для импульсной сварки металлическим электродом в среде защитного газа последовательными дугами, с. 11–18.

**Abe N. et al.** Микросварка тонкой фольги из нержавеющей стали с использованием прямого диодного лазера, с. 19–23.

**Zhang J., Kobayashi A.** Спектроскопический анализ мощной плазмы для распыления при выполнении термобарьерных покрытий, с. 25–30.

**Kobayashi A., Ishibashi N.** Основные характеристики плазменного генератора нового типа, с. 31–35.

**Shibayanagi T. et al.** Контроль процесса роста зерен методом локального нагрева, с. 37–42.

**Shanmugavelayutham G., Kobayashi A.** Влияние параметров обработки на микроструктуру и механические свойства композиционных циркониево-корундовых покрытий, полученных газотермическим напылением туннельного типа, с. 43–47.

**Kobayashi A., Jiang W.** Получение титаново-гидроксиапатитовых фотокаталитических покрытий с помощью плазменного напыления наноструктурного порошка, с. 49–53.

**Chaichanawong J. et al.** Влияние гранулометрического состава композиционных порошков LSM/YSZ на микроструктуру

*TWI CONNECT (Англия) 2005. — № 137 (англ. яз.)*

**Наиболее эффективное** испытание сварных кольцевых швов, с. 1.

**Lee C.-M.** Трудный выбор соответствующего алюминиевого сплава для новой конструкции рабочего колеса турбокомпрессора, с. 2.

*WELDING and CUTTING (Германия) 2005. — № 5 (англ. яз.)*

**Орбитальная** сварка — решение задач в области сварки (Ч. 2), с. 252–255.

**Переработка** ISO 5817 и ISO 10042, с. 278.

**Zwatz R.** Требования к аттестации персонала — сварка и родственные процессы, с. 280–281.

**Lorenz H., Killing R.** Синергетическая настройка установки для сварки вольфрамовым электродом в инертном газе, с. 18–20.

**Vanschen W.** Плазменная резка. Ч. 1: Принцип, геометрия сопла, газы, с. 21–23.

**Aichele G., Bar M.** Орбитальная сварка — решение очень сложных задач (Ч. 1), с. 27–30.

**Storch W. et al.** Ремонт ротора турбины с помощью наплавки, с. 23–27.

**Herman J.** Механизированная сварка ТИГ алюминиевых материалов с применением асимметричного переменного тока, с. 30–32.

туру и характеристики катодов в виде твердых оксидных топливных элементов, с. 55–59.

**Miyamoto Y. et al.** Локализация электромагнитных волн в световых фракталах, с. 61–65.

**El-sheikhy R., Naka M.** Анализ трехмерных разрушений хрупких композитов, с. 67–73.

**El-Sheikhy R., Naka M.** Разрушение под воздействием трехосных нагрузок, с. 75–83.

**El-Sheikhy R., Naka M.** Анализ разрушения анизотропных композитов, с. 85–97.

**El-Sheikhy R., Naka M.** Определение безопасности композиционных материалов и конструкций, с. 99–106.

**Murakawa Hi. et al.** Фрактальный многосеточный метод, используемый для сверхкрупномасштабного моделирования при решении простых механических и термических задач, с. 107–112.

**Liang W. et al.** Измерение деформаций, происходящих в типичных сварных соединениях, с помощью обратного анализа, с. 113–123.

**Serizawa Hi. et al.** Влияние процесса изготовления на внутреннее трение и модуль упругости композитов SiC/SiC, с. 125–130.

**Oku K. et al.** Вязкость разрушения сварных швов на катаной стали двутаврового профиля, выполненных недавно разработанной установкой для стыковой сварки оплавлением, с. 131–134.

**Mathers G.** Компактный образец для испытаний на растяжение и J-интеграл, с. 4–5.

**Нагрев** для сварки трением с перемешиванием, с. 6.

**Bohm S. et al.** Завальцовка фланцев/клеевое соединение с высокорекреационным плавким адгезионным предварительным покрытием, с. 258–263.



**Schubert G. G., Powers D. E.** Новейшие разработки оборудования для электронно-лучевой сварки. Способствующие его применению в области изготовления трансмиссионных компонентов, с. 264–266.

**Staniek G.** Оксиды при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов, с. 271–276.

**Shackleton D., Loos P.** Производство стальных конструкций и железнодорожных вагонов — требования к обеспечению качества в Германии и Европе, с. 281–286.

*WELDING JOURNAL (США) 2005 — Vol. 84, № 7 (англ. яз.)*

**Anderson T.** Основы для решения проблем, свойственных зоне термического влияния алюминиевых сварных швов, с. 22–24.

**Meadows C., Fritz J. D.** Проблемы, связанные с зонами термического влияния нержавеющей стали, с. 26–30.

**Brown L. J., Lin J.** Источник питания для контактной точечной сварки швов небольших размеров, с. 32–36.

**Sperko W. J.** Наплавка валиковых проб с отпуском, с. 37–40.

**Woodward H. M.** 75-летие Института сварочной техники им. В. Хобарта, с. 41–43.

**Gourmelon J.-P.** Стандартизация в области сварки, с. 44–46.

**De A., Deb-Roy J.-P.** Надежные расчеты теплопереноса и жидкого потока при теплопроводной лазерной сварке посредством оптимизации неопределенных параметров, с. 101–112.

**Ramirez J. E. et al.** Свойства и стойкость к сульфидному растрескиванию под напряжением крупнозернистых зон термического влияния в трубе из стали Х60, микролегированной ванадием, с. 113–123.

*WELDING JOURNAL (США) 2005. — Vol. 84, № 8 (англ. яз.)*

**Zefferer H., Morris T.** Руководство по лазерной сварке листового металла, с. 23–28.

**Международная** сварочная ярмарка: Schweissen & Schneiden 2005, с. 30–32.

**Cann J.** Лазерная сварка с дистанционным управлением, с. 34–37.

**Cullison A. et al.** Выставка по сварке, организованная Американским сварочным обществом, с. 38–45.

**Green R.** Использование лазера для более гибкой подачи лазера, с. 46–48.

**Petring D.** Новая технология, которая позволяет выполнять сварку и резку одной и той же лазерной головкой, с. 49–51.

**Campbell K.** Как выполнять очень качественные сварные швы — опыт высококвалифицированных сварщиков, с. 52–54.

**Verhaeghe G.** Волоконный лазер — новинка для сварки и резки, с. 56–60.

**Woodward H. M.** История соревнований по сварке, с. 61–64.

**Kim D. et al.** Определение оптимальных сварочных режимов с помощью методики произвольного контролируемого поиска, с. 125–130.

**Sampath K.** Моделирование на основе ограничений, позволяющее успешно разработать спецификацию на сварочные электроды для ответственных военно-морских конструкций, с. 131–138.

*ZVARANIE-SVAROVANI (Словакия) 2005. — Roc. 54, № 5 (слов. яз.)*

**Barborka J., Kostany F.** Сварка и наплавка сталей способом ТИГ с применением горячей проволоки, с. 127–134.

**Gregoir C. H.** Роботизация в автомобильной промышленности и деятельность фирмы ЭСАБ, с. 134–137.

**Bartos M.** Ремонт и обновление стальных конструкций в энергетике, с. 137–142.

*ZVARANIE-SVAROVANI (Словакия) 2005. — Roc. 54, № 6-7 (слов. яз.)*

**Szakall P.** Роботизированные ГП-модули для дуговой сварки, с. 153–156.

**Novakova L.** Роботизированная сварка осей автомобилей фольксваген марки TOUAREG, с. 157–161.

**Vavrecka J.** Роботизированная резка и сварка на одной установке, с. 161–164.

**Felix M.** Задачи полностью автоматизированного программирования промышленных роботов для резки и сварки труб и сосудов, с. 164–167.

**Jajcay A.** Позиционеры для оборудования рабочих мест при роботизированной сварке, с. 167–173.

**Vrbensky J.** Ремонтная сварка компонентов аппаратов давления без термообработки сварных соединений после сварки, с. 174–175.

## ПОЛЕЗНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ В ОБЛАСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

С 24 по 28 апреля 2006 г. в Харькове состоялась 7-я Международная научно-техническая конференция «Оборудование и технология термической обработки металлов и сплавов в машиностроении» (ОТТОМ-7), являющаяся наиболее значимым профильным форумом. Организаторами конференции выступили Национальная академия наук Украины, Министерство образования и науки Украины, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровский национальный университет, Ассоциация металловедов и термистов Украины, Украинское вакуумное общество.

Председателем организационного комитета конференции был академик НАНУ, д-р техн. наук И. М. Неклюдов, зам. председателя — канд. физ.-мат. наук В. М. Шулаев, ученым секретарем — канд. техн. наук А. П. Редкокаша, техническим секретарем А. Ю. Кириленко.

Конференция была посвящена 75-летию кафедры термической обработки металлов Национальной металлургической академии Украины (зав. кафедрой — проф. Л. Н. Дейнеко), которая по праву считается ядром украинской школы термистов. Она была создана благодаря усилиям многих поколений ученых и педагогов. У ее истоков стояли известные украинские ученые в области металловедения и термической обработки металлов такие, как: А. П. Виноградов, В. Н. Свечников, К. Ф. Стародубов, И. Е. Долженков.

В программу конференции входили: 7-я Международная научно-техническая конференция «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении», 5-й Межгосударственный семинар-практикум «Печное и закалочное оборудование нового поколения для термической обработки металлоизделий», 6-й Научно-практический симпозиум «Функциональные покрытия для повышения качества поверхностей изделий машиностроения», 3-й Научно-технический семинар «Достижения в теории и практике азотирования и карбонитрирования», 4-й Научно-практический семинар «Перспективные материалы в машиностроении», 5-я Школа молодых ученых совместно с курсами повышения квалификации специалистов по технологиям термической и химико-термической обработки.

Конференция проходила на базе Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт».

Конференцию открыл зам. Председателя оргкомитета В. М. Шулаев, который поздравил участников с началом ее работы и пожелал установления новых деловых контактов, плодотворного обмена научным и

практическим опытом, а также определения новых перспектив сотрудничества.

В работе конференции приняли участие более 150 специалистов в области металловедения, материаловедения, термической обработки, металлофизики из ведущих НИИ, КБ, университетов, академий, предприятий машиностроения, металлургии и энергетики, а также фирм-производителей из восьми стран, представлявших 121 организацию.

Конференция включала доклады по результатам фундаментальных и прикладных исследований, а также доклады специалистов промышленных предприятий и фирм по их последним разработкам. Значительное количество докладов было посвящено термообработке сварных соединений.

Вниманию участников было представлено 75 устных и 102 стендовых докладов по следующим направлениям:

проблемы образования и подготовки кадров по специальности «Термическая обработка металлов»; технологии термической и термомеханической обработки;

технологии химико-термической обработки; металловедение для машиностроения; печное и закалочное оборудование для термической обработки металлоизделий;

перспективные материалы в машиностроении; функциональные покрытия для повышения качества поверхностей изделий машиностроения; достижения в теории и практике азотирования; история отечественной термической обработки.

Конференция способствовала дальнейшему укреплению деловых связей между учеными, разработчиками, производителями и эксплуатационниками определенного профиля. Определены перспективные задачи дальнейшей работы.

По материалам работы конференции изданы трехтомный сборник трудов объемом 876 страниц формата А4, содержащий 171 доклад, а также монография И. М. Пастуха «Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде». Все доклады были представлены на высоком научно-техническом уровне с использованием компьютерных технологий. Участники конференции — молодые ученые и инженеры, в ходе ее работы обогатились новым опытом и приобрели соответствующие знания.

С перечнем представленных на конференцию ОТТОМ-7 докладов можно ознакомиться на сайте [www.ottom.com.ua](http://www.ottom.com.ua).

Культурная программа конференции предусматривала товарищеские ужины, приемы, а также интересные экскурсии по достопримечательностям Харькова.

В. В. Дмитрик, канд. техн. наук



## НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ

Редколлегия и редакция журнала «Автоматическая сварка» поздравляют *Игоря Витальевича Кривцуна и Виктора Федоровича Хорунова* с избранием их членами-корреспондентами Национальной академии наук! Желаем крепкого здоровья и дальнейших творческих достижений.

*Кривцун Игорь Витальевич (1954 г., г. Константиновка, Донецкой обл.) — физик, специализация «Теоретическая физика». Доктор технических наук (2003). Закончил Киевский госуниверситет (1976). С этого времени работает в Институте электросварки НАНУ: с 1989 г. — старший научный сотрудник, с 2004 г. — зав. отделом. Направление научных исследований: физика газового разряда, теория сварочных процессов, гибридные лазерно-плазменные процессы сварки и обработки поверхности.*



*Хорунов Виктор Федорович (1937 г., г. Кемерово, РФ) — инженер-металлург. Доктор технических наук (1985), профессор (1993), лауреат Государственной премии УССР (1988). Закончил Киевский политехнический институт (1959). С этого времени работает в Институте электросварки НАНУ: с 1969 г. — старший научный сотрудник, с 1987 г. — зав. отделом. Направление научных исследований: материаловедение, высокотемпературная пайка, соединение новых перспективных материалов.*

## Н. В. СМОРНОВУ — 50 ЛЕТ



15 июня исполняется 50 лет генеральному директору ОАО «Институт сварки России» (ВНИИЭСО) Николаю Владимировичу Смирнову. Н. В. Смирнов — выпускник Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина (ныне Санкт-Петербургский политехнический университет), где в 1979 г. закончил кафедру технологии и оборудования сварочного производства. Его преподавателями были такие «корифеи» сварочной науки, как Г. Л. Петров, В. П. Демянцевич, К. К. Кочергин, В. В. Башенко. Выбором своей научной специализации он обязан дипломной практикой в Институте электросварки им. Е. О. Патона. Начатые им там исследования лазерных технологических процессов привели к появлению около ста научных работ, изобретений и патентов по выбранной тематике и защите в 1986 г. кандидатской диссертации. До конца девяностых Н. В. Смирнов работал доцентом в своем родном вузе, генеральным директором совместного предприятия, преподавал в США. С 1998 г. Н. В. Смирнов работает в ОАО «Институт сварки России». «Почетный машиностроитель», профессор, действительный член Российской инженерной академии, международный инженер по сварке, член редколлегии

журнала «Сварочное производство» — это не все звания, которыми можно охарактеризовать его достижения. Помимо основной деятельности, он в 2005 г. закончил Академию народного хозяйства по специализации «Менеджмент». Вместе с ведущими специалистами сварочной подотрасли стал одним из организаторов Союза разработчиков и производителей сварочной продукции РФ и в настоящее время является его вице-президентом. В рамках союза участвовал в разработке программы развития отечественной сварки до 2011 г.

Н. В. Смирнов является автором концепции информационно-аналитического сайта [www.gossvarka.ru](http://www.gossvarka.ru), незаменимого помощника многих специалистов и инженеров, работающих в области сварочного производства.

Юбиляр активно занимается боевыми искусствами, является обладателем 8 Дана по каратэ, президентом Федерации каратэ Санкт-Петербурга, президентом Международного колледжа боевых искусств «АЙ-МАК», членом президиума Всемирного союза каратэ (WКУ).

*Сердечно поздравляем Николая Владимировича с юбилеем, желаем крепкого здоровья и дальнейших творческих успехов.*

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

## АНТК ИМЕНИ О. К. АНТОНОВА — ВЕДУЩИЙ ЦЕНТР НОВЕЙШИХ ТЕХНОЛОГИЙ

В этом году исполняется 60 лет со дня основания Авиационного научно-технического комплекса им. О. К. Антонова. Свои первые шаги АНТК сделал в 1946 г. как опытно-конструкторское бюро самолетостроения под руководством Главного конструктора Олега Константиновича Антонова. К настоящему времени эта фирма превратилась в одно из передовых предприятий Украины, известное во всем мире. Сегодня «Антонов» — это опытный коллектив, располагающий конструкторским бюро, лабораторно-испытательным комплексом, опытным заводом, летной испытательной базой и авиакомпанией по международным грузовым авиаперевозкам. За 60 лет здесь разработано более 100 типов и модификаций летательных аппаратов, основана своя школа создания транспортных самолетов. Именно здесь были созданы многоцелевой биплан Ан-2, первый в СССР специализированный военно-транспортный Ан-8, первый в мире широкофюзеляжный Ан-22 «Антей», один из наиболее известных пассажирских самолетов Ан-24, славные многоцелевые семейства Ан-74 и Ан-32, самые грузоподъемные в мире Ан-124 «Руслан» и Ан-225 «Мрия» и многие другие. В течение последнего десятилетия на воздушные трассы вышли легкие многоцелевые Ан-38, пассажирские турбовинтовые Ан-140 и конвертируемые грузопассажирские Ан-74ТК-300. Завершается программа летных испытаний военно-транспортного самолета короткого взлета и посадки Ан-70, которому пока нет равных в мире, и регионального реактивного пассажирского самолета нового поколения Ан-148. Все эти машины воплощают в себе фирменный стиль «Ан», который можно определить как сочетание целесообразности, экономичности и надежности.



Они производятся на десятках предприятий Украины и России, давая работу сотням тысяч человек. Кроме того, самолеты «Антонов» строятся в Иране, Польше, Китае. В отношениях с этими странами Украина выступает в роли экспортера «ноу-хау», передовых технологий и научных идей. Вообще из 22 тысяч построенных «Анов» более 1,5 тысяч продано в 72 страны мира.



Создание самолетов такого уровня невозможно без применения новейших технологий проектирования, производства и испытания. В основе их лежит соединение прогрессивных конструкторских идей, использование новых материалов и способов неразъемного соединения их путем плавления и в твердом состоянии. В качестве примеров следует упомянуть технологию и оборудование для получения клеесварных соединений, применение высококонцентрированных источников сварочного нагрева с помощью электронного и лазерного лучей, производство сварных оболочек и стрингерных панелей из тонколистовых материалов, изготовление узлов из пеноалюминия. АКБ им. Антонова было пионером в освоении новых алюминиевых сплавов, которые являются основными конструкционными материалами в пассажирских и транспортных самолетах, а также в изделиях ракетно-космической техники (до 80 % по массе). Для дальнейшего укрепления позиций алюминия в самолетостроении ускоренными темпами развиваются работы по созданию новых более легких и прочных алюминиево-литиевых сплавов, сплавов предельно высокого легирования и гранулируемых сплавов. По прогнозам на начало XXI века объем использования таких сплавов и композиционных материалов на основе алюминия в конструкции планера самолетов составит около 50 %. Распространению указанных материалов в производстве ответственных изделий способствуют интенсивные исследования свариваемости и разработка эффективных мер по повышению прочности и надежности сварных соединений.



Современный самолет немыслим без широкого применения в нем конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ), в создании и внедрении которых АНТК им. О. К. Антонова занимает лидирующее положение в отечественной авиационной промышленности с 1970-х годов и до настоящего времени. Эти конструкции на основе углеродных, стеклянных, органических и гибридных армирующих волокон по комплексу свойств в 2-3 раза превосходят металлические материалы. В частности, они отличаются на 25...30 % меньшим весом, на 50...80 % сниженной трудоемкостью изготовления, лучшим качеством внешней поверхности, повышенной коррозионной стойкостью. Благодаря этим и другим полезным качествам ПКМ находят в конструкции самолетов все более широкое применение. Если раньше из них изготавливали в основном несилловые элементы конструкции, то в процессе создания новых «Анов» из ПКМ формируются самые ответственные высоконагруженные агрегаты крыла и оперения самолета, средства механизации несущих поверхностей и значительная часть внешней обшивки самолета. Например, на Ан-70 из ПКМ сделаны киль, предкрылки и закрылки, элероны и интерцепторы, практически

все обтекатели и зализы, створки грузолюка и многое другое. Объем применения композитов в Ан-70 достигает 25 от общей массы конструкции против 6 % на «Руслане». Благодаря этому удалось достичь значительно более высокой транспортной и экономической эффективности самолета в целом.

Стремясь достичь максимального эффекта от разработанных ими новейших техпроцессов, специалисты АНТК постоянно расширяют сферу их применения. Так, более десяти лет назад на предприятии было положено начало такому виду деятельности, как создание наземных видов транспорта. Рациональное использование здесь авиационных технологий позволило придать созданным образцам высокие потребительские качества. Так, выпускаемые серийно троллейбусы «Ан» отличаются от аналогов меньшей массой, меньшим потреблением электроэнергии, намного более высокой коррозионной стойкостью и длительным сроком службы. По тем же принципам спроектирован и изготовлен кузов единственного в СНГ низкопольного трамвая. Список разработок дополняет специальный вагон для Одесского морского порта, кузов рефрижератора, электробус, вагон классического метро, автобус и спортивные велосипеды из углепластика, на которых выступает олимпийская сборная Украины.

Впечатляющим свидетельством роста технологических возможностей АНТК им. О. К. Антонова стали разработки в области авиационно-космической тематики. В последнее время завершены исследования нескольких проектов «летающих космодромов» на базе Ан-124 и Ан-225. Запуск с борта этих самолетов космических объектов позволяет добиться беспрецедентно широкого диапазона возможных углов наклона орбит и многократного снижения стоимости выведения полезной нагрузки. Сегодня совместно с предприятиями Российской Федерации на базе Ан-124 реализуется программа космической системы «Воздушный старт».

На АНТК им. О. К. Антонова развиваются практически все технологические направления в авиастроении. Причем происходит это системно, в соответствии с конкретными программами повышения технического уровня самолетов «Антонов».

Интегрирующим звеном в этом сложном процессе выступают современные компьютерные информационные технологии (КИТ). Стратегия их применения предусматривает разработку и реализацию на АНТК и на предприятиях-партнерах технологии полного электронного определения изделия и параллельного инжиниринга, основанного на трехмерном моделировании и создании интегрированной базы данных проекта. Уже сегодня на фирме сданы в эксплуатацию несколько конструкторских залов компьютерного моделирования, оснащенных новейшими компьютерными станциями, введены в строй серверы и ядро вычислительной сети, внедрены современные системы автоматизированного проектирования. Оборудованы 300 рабочих мест, позволяющих выполнять трехмерное проектирование. Многоуровневая информационная система на предприятии обеспечивает комфортное непрерывное взаимодействие пользователей как с основными информационными ресурсами комплекса, так и между собой. Организована система обучения конструкторов и технологов, разрабатывается программа обучения работы с КИТ для всех категорий специалистов. Внедрение КИТ обеспечивает повышение качества и оперативную реализацию запросов заказчика при создании и модификации изделий, а также позволяет АНТК участвовать в совместных международных авиационных проектах.

Первым самолетом, полностью разработанным на основе трехмерного компьютерного проектирования, стал региональный реактивный Ан-148. Применение КИТ позволило значительно уменьшить трудоемкость разработки агрегатов и отдельных элементов самолета. Так, цикл создания электрожгутов сокращен в 5-6 раз, а цикл создания деталей и оснастки — в 2,5-3 раза.

Не только широкие технологические возможности, но и бесценный интеллектуальный потенциал, корпоративная культура, традиционный творческий дух и развитая научно-техническая инфраструктура вселяют уверенность в том, что и в будущем изделия с маркой «Ан» будут воплощать в себе наиболее значимые достижения науки и техники. Достижения и возможности АНТК им. О. К. Антонова получают высокую оценку и на государственном уровне. Президент Украины В. А. Ющенко в своем обращении к коллективу предприятия, в частности, отметил: «Славная марка «Антонов» укрепляет авторитет Украины как самолетостроительной державы. Уверен, что последователи Олега Антонова и в дальнейшем будут достойно продолжать его дело, содействуя наращиванию производства высокотехнологической продукции, усилению приоритетных позиций отечественного авиастроения».



## НАШ ПРИОРИТЕТ — КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ

Научно-промышленная фирма «КОРБА» свою деятельность начала в феврале 1992 г. и последние 12 лет специализируется на поставках сварочных материалов, производимых на лучших заводах концерна ESAB. Основополагающим принципом фирмы всегда был и остается безусловный приоритет качества продукции, предлагаемой потребителю.

В феврале 1997 г. НПФ «КОРБА» организовала и провела семинар с участием более 100 главных сварщиков, представлявших ведущие предприятия страны, в том числе Черноморский судостроительный завод, Южный машиностроительный завод, Киевский завод «Ленинская Кузница», Новокраматорский машиностроительный завод. В нем приняли участие вице-президент ESAB International AB и сотрудники Московского представительства концерна ESAB. Семинар послужил мощным импульсом в понимании необходимости применения в производстве высококачественных сварочных материалов и надежного оборудования, а также передовых технологий сварки с целью повышения конкурентоспособности отечественных предприятий. Вскоре после проведенного мероприятия НПФ «КОРБА» заключила ряд комплексных договоров, по которым начались поставки материалов и оборудования для Николаевского ПО «ЗАРЯ», Черноморского судостроительного завода, Киевского завода «Ленинская Кузница», Черниговского пивкомбината «ДЕСНА» и др.

Учитывая многоплановость задач, стоящих перед производственными предприятиями, а также многообразие сварочных материалов, производимых концерном ESAB, НПФ «КОРБА» приняла участие в совместной с ИЭС им. Е. О. Патона разработке компьютерной системы, способствующей обоснованному выбору сварочных материалов для дуговой сварки конструкционных сталей. Система помогает значительно сократить объем экспериментов, направленных на правильный выбор материалов, режимов и условий сварки за счет использования средств математического моделирования. Возможности системы позволили сократить количество экспериментов в 7 раз, а также повысить производительность процесса сварки в 1,8 раза (по наплавленному металлу).

В последние годы в США, Японии, странах Западной и Восточной Европы наблюдается значительный рост потребления порошковых проволок, что обусловлено их особыми достоинствами и экономической эффективностью. Сварка порошковыми проволоками сочетают преимущества автоматической сварки под флюсом и сварки проволоками сплошного сечения в среде защитных газов. Они обеспечивают безопасное проплавление при значительной мощности процесса сварки по сравнению с проволоками сплошного сечения; меньшее разбрызгивание и легкое управление дугой; меньшее содержание диффузионного водорода в металле шва; возможность качественной сварки рутиловыми и основными порошковыми проволоками во всех пространственных положениях; возможность вести сварку на высокой скорости подачи; низкую склонность к образованию трещин; высокую стабильность сварочного процесса; повышенную надежность против образования пор. Кроме того, при правильном использовании порошковой проволоки стоимость сварочных работ снижается, о чем свидетельствуют результаты сравнительных расчетов стоимости одного погонного метра сварного шва, выполненного порошковой проволокой и проволокой сплошного сечения.

НПФ «КОРБА» приступила к интенсивному внедрению различных порошковых проволок после успешного осуществления контракта по изготовлению специального оборудования для работы в условиях низких температур севера Канады. Наряду с традиционными материалами, высокопроизводительные порошковые проволоки малого диаметра для всепозиционной сварки низкоуглеродистых и высокопрочных сталей, а также проволок для упрочняющей наплавки нашли широкое применение в судостроении и судоремонте, на предприятиях машиностроительной и нефтегазовой отраслей, при изготовлении подъемно-транспортного оборудования. Фирма занимается не только поставками, но и оказывает консультации, обучение за границей и технологическую поддержку, что является существенным подспорьем для потребителя. Хорошо зарекомендовала себя также идея прохождения практики студентами сварочного факультета НТУУ «КПИ» на базе фирмы, во время которой будущие инженеры-сварщики получают дополнительные знания о последних достижениях в сфере производства сварочных материалов, а некоторые из них — и трудоустройство сразу же после окончания учебного заведения.

Оперативность выполнения заказов и гибкая ценовая политика фирмы в сочетании с преимуществами и высоким качеством материалов, подтвержденным ведущими международными классификационными обществами, делают еще более привлекательным, целесообразным и экономически выгодным внедрение предлагаемой продукции на отечественных предприятиях.

## Книги ❖ Монографии ❖ Труды конференций

- Ryabov V.R., Dobrushin L.D., Jung-Gi Moon. *Welding of Bimetals*. — 2003. — 130 p., format 140×200 mm, 100 грн./720 руб./38\$\*.
- Lysak V.I., Kuzmin S.V. *Explosive Welding of Metal Layered Composite Materials*. — 2003. — 118 p., format 140×200 mm, 100 грн./720 руб./38\$.
- Juttner B., Vasenin Yu.L. *Cathodic Processes of the Metal Vapor Arc*. — 2003. — 68 p., format 140×200 mm, 100 грн./720 руб./38\$.
- *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. — 266 с., формат 200×290 мм, 100 грн./720 руб./38\$.
- *Laser Technologies in Welding and Materials Processing*: Сб. докл. Междунар. конф., 19–23 мая 2003 г., пос. Кацивели, Крым / Под ред. проф. В. С. Коваленко. — 2003. — 256 с., формат 200×290 мм (англ. яз.), 100 грн./720 руб./38\$.
- *Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах*: Сб. докл. Второй Междунар. конф., 13–17 сент. 2004 г., пос. Кацивели, Крым / Под ред. проф. В. И. Махненко. — 256 с., формат 200×290 мм, 100 грн./720 руб./38\$.
- *Контактная сварка и другие виды сварки давлением*: Сборник. Содержит подборку статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» за 2001–2005 гг., по проблемам различных видов сварки давлением. — 2005. — 128 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 75 грн./720 руб./38\$.
- *Трубопроводный транспорт*: Сборник. Содержит подборку статей, опубликованных в журналах «Автоматическая сварка» и «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» за 2001–2005 гг., по проблемам трубопроводного транспорта. — 2005. — 178 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 75 грн./720 руб./38\$.
- *КАТАЛОГ. Технологии. Материалы. Оборудование*. Содержит информацию о разработанных в последние годы в ИЭС технологиях, материалах и оборудовании для сварки, резки, наплавки, пайки, нанесения защитных покрытий и других родственных процессов, предлагаемых для коммерческой реализации. — 2005. — 260 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 100 грн./960 руб./50\$.
- *ТИТАН: технологии, оборудование, производство*: Сборник. Содержит подборку статей, опубликованных в журналах «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за 2001–2004 гг., по электрометаллургии и сварке титана и его сплавов. — 2005. — 196 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 100 грн./960 руб./50\$.
- Письменный А. С. *Индукционный нагрев при сварке и родственных технологиях*. — 2005. — 140 с. — формат 140×200 мм, мягкий переплет, 25 грн./240 руб./20\$.
- Гарашук В.П. *Вступ до фізики лазерів*. — 2005. — 244 с. — формат 140×200 мм, мягкий переплет, 40 грн./360 руб./38\$.
- *Laser Technologies in Welding and Materials Processing*: Сб. докл. Второй междунар. конф., 23–27 мая 2005 г., пос. Кацивели, Крым / Под ред. проф. В. С. Коваленко. — 2005. — 246 с., формат 200×290 мм (англ. яз.), 100 грн./720 руб./38\$.
- Makhnenko V. I., Pochynok V. E. *Strength Calculation of Welded Joints with Adjacent Sharp Cavities* (англ. яз.). — 2006. — 266 с. — формат 165×235 мм, мягкий переплет, 250 грн./2250 руб./90\$.
- Kononenko V. Ya. *Technologies of Underwater Wet Welding and Cutting*. — 2006. — 140 с. — формат 140×200 мм, мягкий переплет, 100 грн./900 руб./40\$.

По вопросам заказа просьба обращаться  
в редакцию журнала «Автоматическая сварка»  
Тел./факс: (38044) 271 24 03, 529 26 23, 528 04 86  
E-mail: journal@paton.kiev.ua

\* Цены указаны с НДС соответственно для Украины, России и дальнего зарубежья с учетом доставки заказной бандеролью.

Более 13 лет на рынке сварочного оборудования Украины



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

- Электрогазосварочное оборудование
- Горелки к полуавтоматам
- Электрододержатели
- Пусконаладочные работы
- Ремонт сварочного оборудования, в том числе сложного
- Технологическое обеспечение сварочных процессов
- Автоматизированные сварочные линии и комплексы



тел. (380612) 33 1058,34 3623,  
13 2269,(38061) 220 0079 e-mail: weld@triada.zp.ua

Электромашино-  
строительный завод  
«ФИРМА СЭЛМА»



**ПРОИЗВОДСТВО  
ЭЛЕКТРОСВАРОЧНОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ**



**60 лет  
в мире сварки**



95000, г. Симферополь, Украина  
ул. Генерала Васильева, 32А  
Тел.: (0652) 48-65-37, 48-18-62  
E-mail: sales@selma.crimea.ua

**www.selma.ua**


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

**ГОРЮЩИЙ ДИМ 03680, г. Киев, Украина, пр-т Глушкова, 1, пав.№21, тел./факс: (+380 44) 526-93-70,  
ЗВАРЮВАННЯ 526-93-76, 526-93-75, 526-92-16, e-mail: igor@welding.kiev.ua, house@welding.kiev.ua**

**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



г. Киев, 03150,  
ул. Боженко, 11  
www.gefest-sv.com.ua  
gefest-sv@kiev.web.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
  - ТМУ-21У
  - ЦА-39
  - ТМА-1У
  - ТМА-3У
- Наплавки слоев со специальными свойствами
  - ЦН-12М
  - ЦН-6А
  - НИИ-48Г
  - Т-590
  - НР-70
  - ЦЧ-4
  - Гефест-6 (ОЗН-6)
  - ЦНИИ-4

А также множество других марок  
на заказ

**ГОРЕТЬ, ЧТОБЫ СОЗДАВАТЬ!**

**Вся продукция СЕРТИФИЦИРОВАНА**

**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** плавные 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

**Лидер производства порошковых проволок в Украине**



**ООО "ТМ.ВЕЛТЕК"**

Порошковые проволоки для наплавки  
по ГОСТ 26101-84

-80X20 P3T, 35B9X3CF, 25X5ФМС, 18X1Г1М и др.

Порошковые проволоки ВЕЛТЕК

-ВЕЛТЕК H200 - H620

Порошковые проволоки для сварки

-АН1, АН8, АН39, АНЧ-2 и др.

Порошковые проволоки ТМВ

-ТМВ3, ТМВ6, ТМВ7, ТМВ11, ТМВ14, ТМВ29 и др

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



**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 MMA и TIG 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 - ЭПС"**

**ОАО "ЗОНТ"**  
**АВТОГЕНМАШ**

Машины для термической резки "Комета М"  
Машины для микроплазменной резки "Метор"  
Переносные газорезущие машины "Радуга"  
Машины для фигурной газокислородной резки "АСШ - 70М"

Капитальный ремонт и модернизация МТР  
Поставка источников плазменной резки,  
насосов, теплообменников и газосных частей  
к криогенному оборудованию

oaozont@zont.com.ua т. +38048 717-00-50  
www.zont.com.ua ф. +38048 715-69-50  
65104, Украина, пр. Маршала Жукова, 103

**Завод автогенного оборудования**  
г. Краматорск

**Сертифицированная продукция!**

**РЕЗЕРВУАРИ**

Резаки Р1 "Донмет"	- 54 грн.
Горелки газосварочные Г2 "Донмет"	- 46 грн.
Горелки для кровли ГВ "Донмет"	- 23 грн.
Керосинорезы РК-200	- 115 грн.
Бачки керосиновые БГ-08 "Донмет"	- 123 грн.
Редуктор БПО "Донмет"	- 37 грн.
Редуктор БКО "Донмет"	- 73 грн.

АСП-10, баллоны, вентили баллонные,  
рукава резинотканевые, манометры, карбид...

Тел./факс (0626) 44-26-85, (06264) 5-77-13

E-mail: [svarka@donmet.com.ua](mailto:svarka@donmet.com.ua)

<http://www.donmet.com.ua>



**СпецСплав** [www.spetssplav.dp.ua](http://www.spetssplav.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@spetssplav.dp.ua](mailto:sp@spetssplav.dp.ua)

**ЗАРЕЗЕРВИРУЙТЕ место**  
**для Вашей рекламы**  
**в следующих номерах.**

**Звоните:**  
**(044) 529 26 23, 287 63 02**

**V МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕСС**  
**«МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ'06»**

20 – 23 сентября 2006

Варна, Болгария



**Тема конгресса**

«Инновационные решения для развития изделий и процессов»

**Организаторы:**

Научно-техническое общество машиностроителей Болгарии  
Университет в Карлсруэ — Германия

**Для контактов:**

Научно-техническое общество машиностроителей, ул. Г. С. Раковски, 108, София 1000  
тел./факс (+3592) 986 22 40, тел. (+3592) 987 72 90  
[nts-bg@tea.bg](mailto:nts-bg@tea.bg), [www.met.tea.bg](http://www.met.tea.bg)

## 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](http://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](mailto:journal@paton.kiev.ua)



## ПОДПИСКА – 2006 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
	150 грн.	300 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 отступить 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 11.05.2006. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 7,8. Усл. кр.-отт. 8,3. Уч.-изд. л. 8,9 + 4 цв. вклейки.

Цена договорная.

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